



ESTUDIO COMPARATIVO DE MATERIALES COMO RESPUESTA A LA NORMA FMVSS 201U. PROTECCIÓN DE LA CABEZA EN EL IMPACTO CONTRA ZONAS INTERNAS DEL VEHÍCULO

JESÚS PELÁEZ VARA, JUSTO RUIZ CALVO,
BASILIO RAMOS BARBERO, ESTEBAN GARCÍA MATÉ

Universidad de Burgos, Escuela Politécnica Superior
Avda. Cantabria s/n, 09006 Burgos, España

(Recibido 17 de marzo de 2004, para publicación 9 de febrero de 2005)

Resumen – Con este trabajo hemos pretendido crear una base de datos, de materiales usados como protectores, para el cumplimiento de la normativa FMVSS 201. Para realizar la experimentación se ha construido el banco de ensayos de caída libre, que con un valor de referencia común, nos ha permitido realizar un estudio comparativo de los materiales ensayados. Del estudio realizado se han obtenido las siguientes conclusiones: De forma general el incremento de efectividad de los protectores aumenta con el espesor de los mismos. Las espumas no recuperables tienen un buen comportamiento frente a variaciones de temperatura. La disminución de la densidad de la espuma aumenta el incremento de efectividad. Las estructuras tubulares con láminas de acero son más eficaces que las estructuras tubulares con láminas de aluminio. En las estructuras tubulares redondas, la posición del tubo no ejerce influencia sobre el incremento de efectividad. Dentro de las estructuras tubulares rectangulares, la eficacia aumenta al acercarse a la sección cuadrada.

Palabras clave – Contramedidas, protectores, impacto de cabeza, FMVSS 201U.

1. INTRODUCCIÓN

La FMVSS 201U (Federal Motor Vehicle Safety Standar 201) [1] se ocupa de la protección de los pasajeros, en situaciones de impacto, contra elementos interiores del automóvil como traviesas, raíles laterales, pilares o techo. Esta norma establece los criterios que deben ser cumplidos en el diseño de las piezas del interior del habitáculo, para que, en caso de colisión, se minimice el riesgo de daño, por golpe en la cabeza de los ocupantes, al impactar con dichas piezas.

El ensayo FMVSS 201U, comúnmente conocido como ensayo de impacto del vuelo de la cabeza (FMH Free Motion Headform), es un ensayo dinámico que simula el impacto de la cabeza contra las piezas internas del vehículo. El equipo necesario para la simulación es la cabeza del maniquí híbrido III modificado, que tiene una masa de 4,54Kg.

La velocidad de impacto para el ensayo es de 6.7 m/s. Pero si el vehículo está dotado con sistemas dinámicos de seguridad, como airbag de cabeza, el ensayo se puede hacer a 5 m/s en las zonas protegidas con estos elementos, más un ensayo de poste, según lo descrito en la norma federal 214, con el que se comprueba la eficacia de los elementos de seguridad dinámicos.

El criterio utilizado por la norma FMVSS 201U, analiza la gráfica de aceleración obtenida por los sensores instalados en la cabeza del maniquí, y a partir de ella se calcula:

$$HIC = \max \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a \cdot dt \right]^{2.5} \cdot (t_2 - t_1)$$

Donde a es la aceleración de la cabeza, expresada como un múltiplo de la aceleración de la gravedad; t_1 y t_2 son dos instantes durante el impacto, separados por no más de 36 ms, y que maximizan la integral.

A partir del HIC se calcula el HIC(d) por la siguiente expresión:

$$\text{HIC}(d) = 0.75446 \cdot \text{HIC} + 166.4$$

El criterio utilizado es que el HIC(d), para cualquier objetivo impactado no puede exceder de 1000. Sin embargo, la mayor parte de los fabricantes de automóviles han establecido límites un 20% inferiores a los exigidos por la norma para protegerse de la variabilidad en los resultados de los ensayos [2].

El objetivo de este trabajo es crear una base de datos, de materiales ampliamente usados como absorbedores de energía, que sirva de guía a la hora de seleccionar el material adecuado, para conseguir el criterio marcado por la norma.

2. PROTECTORES

Si se realizase el ensayo según el procedimiento descrito en la normativa, sobre un vehículo sin ninguna protección [3], obtendríamos un valor del HIC(d) que recibe el nombre de valor de referencia. Este valor normalmente es superior al valor máximo admitido, por lo que para cumplir con las exigencias de la norma, se dispone de distintos materiales que reciben el nombre de protectores. Es decir, por protector se entiende, todo material que es capaz de absorber una cantidad de energía suficiente, que evite daños en la cabeza de los pasajeros, en caso de colisión del vehículo.

Las protecciones son necesarias porque el vehículo está compuesto de una serie de chapas, unidas entre sí, que componen la estructura del vehículo. Esta estructura está diseñada para que aporte la rigidez necesaria durante la vida útil del vehículo. Como consecuencia de esto, hay zonas de la estructura del vehículo con una rigidez muy elevada, que si son golpeadas directamente por la cabeza del pasajero, las deceleraciones sufridas por la misma, harían que se superase el valor del HIC(d) establecido por la norma. Para evitar riesgos a los pasajeros se disponen elementos absorbedores de energía o protectores, que disipan la energía de la cabeza antes de entrar en contacto con las paredes rígidas de la estructura.

Los materiales normalmente usados como protectores se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Espumas
- Tubos
- Plásticos

Las espumas, dependiendo de la resina utilizada, se pueden clasificar como termoplásticas o termoestables. Dentro de las espumas termoplásticas se encuentran el polipropileno expandido (EPP), el poliestireno / óxido de polifenileno (PS/PPO) comercialmente conocido como Gecet, y el poliestireno expandido (EPS). Dentro de las espumas termoestables se encuentran el poliuretano (PU).

Las espumas también se pueden clasificar como no recuperables y recuperables [4]. Las espumas no recuperables absorben la energía destruyendo las paredes de las celdas que forman la espuma Fig. 1, y presentan la ventaja de que absorben la energía sin producir rebote de energía hacia los pasajeros. Dentro de las espumas no recuperables se encuentran las de poliestireno / óxido de polifenileno (Gecet), las de poliestireno expandido (EPS), las de poliuretano desmenuzable (FPU) y las de tipo celda. Las espumas recuperables absorben la energía expulsando el aire fuera de la celda Fig. 2, además de deformando las paredes de las celdas pero sin llegar a destruirlas. Las espumas recuperables tienen el inconveniente de

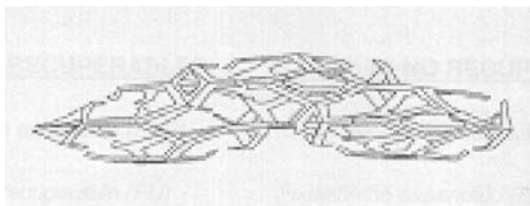


Fig. 1. Espumas no recuperables.

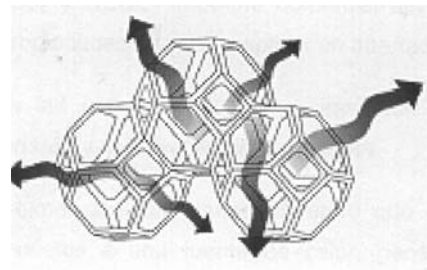


Fig. 2. Espumas recuperables.



Fig. 3. Estructuras tubulares.

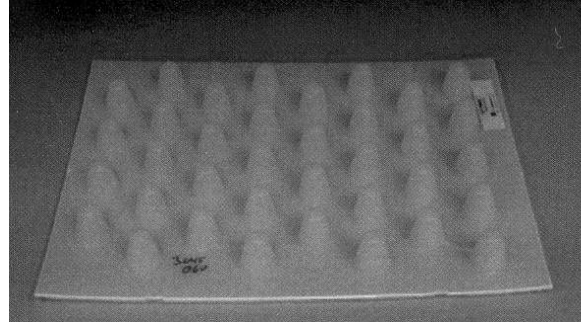


Fig. 4. Plásticos de seguridad.

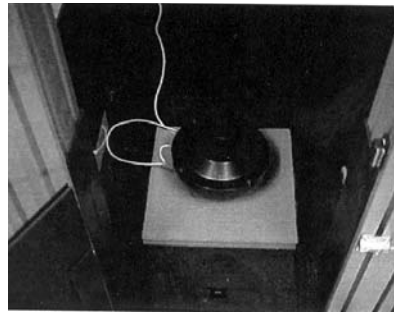


Fig. 5. Banco de ensayos de caída libre.

que producen rebotes de energía hacia los ocupantes. Como espumas recuperables cabe citar el polipropileno expandido (EPP) y el poliuretano recuperable (RPU).

Las estructuras tubulares Fig. 3, están formadas por una capa interior de papel, capas centrales de metal en forma de finas hojas, y una capa exterior de papel, radialmente devanadas sobre un mandril, para formar un tubo redondo que es corrugado [5].

Entre los materiales plásticos se encuentra la estructura conocida como plásticos de seguridad, que consiste en una serie de huecos construidos sobre una superficie plana Fig. 4.

3. BANCO DE ENSAYOS DE CAÍDA LIBRE

El impacto de cabeza es un problema puramente energético. Una cabeza de 4.54 Kg, desplazándose a una velocidad de 6.7 m/s, choca contra un elemento de la estructura del automóvil. La energía cinética de la cabeza viene dada por la siguiente expresión: $E = 0.5 \cdot m \cdot v^2 = 0.5 \cdot 4.54 \cdot 6.7^2 \cong 102 \text{ J}$.

Estudios realizados mediante el programa de simulación Pam-Crash, demuestran que la máxima cantidad de energía, que absorben los protectores, es del orden del 40% de la energía cinética anteriormente calculada, siendo el resto absorbida por la estructura del vehículo.

Con el objeto de conocer el comportamiento de los materiales usados como protectores, se han diseñado diversos equipos de ensayo. De este modo en [6] se ha utilizado el equipo construido por MGA, que simulando el pilar-A, ha permitido clasificar los materiales en función del pico de aceleración y de la energía absorbida a los 16 mm de desplazamiento. El ensayo utilizado en [7] permite incrementar la velocidad del ensayo, hasta conseguir la completa invasión del espesor de 20 mm de las muestras utilizadas. Nosotros hemos diseñado un sistema que pone en juego un valor de energía en torno a los 40 J. El banco de ensayos de caída libre está formado por una semiesfera de acero de 5.716 kg y 161 mm de diámetro, que se deja caer libremente desde una altura de 659.5 mm y que genera una energía en su caída de 36.94 J.

El banco de ensayos Fig. 5 consta de una estructura soporte realizada en perfilera de aluminio y dos placas base de acero. La distancia vertical entre las dos placas es de 750 mm y la distancia entre la parte inferior de la semiesfera y la placa inferior es de 659.5 mm. En el centro de gravedad de la semiesfera se coloca un acelerómetro que sirve para medir la deceleración sufrida en el impacto. En la parte superior de la semiesfera se alojan cuatro electroimanes, que sirven para mantener la semiesfera sobre la placa superior, previamente a la realización del ensayo. Además el banco de ensayos va equipado con el software que se encarga de recoger la señal del acelerómetro para su tratamiento, dando como resultados de salida, la curva aceleración – tiempo, el HIC, el HIC(d), el pico de aceleración y los tiempos t_1 y t_2 utilizados en el cálculo del HIC.

4. ESTUDIO DEL VALOR DE REFERENCIA

Como se ha dicho anteriormente el valor de referencia es el valor del HIC(d) obtenido sin protector. El valor de referencia que se obtendría en el banco de ensayo, sería el HIC(d) obtenido cuando la semiesfera golpeará la placa inferior de acero que forma parte de la estructura. El golpe sería aparatoso a la vez que peligraría la funcionalidad de la máquina. Por este motivo se ha buscado un material que se utilizará siempre sobre la base de acero del banco de ensayos, para que amortigüe el golpe. Por tanto, el valor de referencia del banco de ensayos será el HIC(d) obtenido al lanzar la semiesfera sobre dicho material.

El material elegido fue el Cellasto (Poliuretano microcelular), por tratarse de un material de excelente durabilidad dinámica y características consistentes a largo plazo. Para determinar el valor de referencia se tomaron 4 muestras de 10 mm de espesor y 2 muestras de 15 mm de espesor, que se ensayaron 10 veces cada una. Para el Cellasto de 10 mm de espesor se obtuvo un valor medio del valor de referencia de 2334 y para el de 15 mm se obtuvo un valor medio del valor de referencia de 1145.

Para el estudio de los materiales se utiliza como base el Cellasto de 10 mm de espesor, ya que los resultados, de acuerdo con [3] son más representativos. El valor de referencia para el espesor de 15 mm absorbe más energía en el impacto que el valor de referencia para el espesor de 10 mm, enmascarando los resultados de los materiales ensayados.

La utilización de un valor de referencia común nos permite conocer el comportamiento de los protectores respecto de una misma referencia, permitiendo comparar los resultados obtenidos. Sin embargo el valor de referencia real depende de los puntos de impacto y del vehículo ensayado.

5. RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACION

Como se ha dicho anteriormente, con este trabajo se pretende crear una base de datos de protectores, que sirva de guía en la selección de los mismos y que permita cumplir con los criterios establecidos por la normativa. Hay que tener en cuenta, que en la elección de un protector para un punto objetivo de un vehículo determinado, a parte de las exigencias de impacto, hay otros factores como fabricación, apariencia, durabilidad, espacio disponible y costos, que juegan un papel importante en la decisión final.

Los materiales que hemos utilizado en la experimentación han sido los siguientes:

- Espumas de poliuretano recuperable (E 175) y espumas no recuperables (P3).
- Espumas de polipropileno expandido (Morval y Neopolen).
- Espumas tipo celda.
- Espumas de poliestireno expandido / óxido de polifenileno (Gecet)
- Plásticos de seguridad
- Tubos (Oflex y Clevaflex)

Los materiales se han ensayado a las temperaturas de -16 °C, 23 °C y 85 °C. Hay que tener en cuenta que la FMVSS 201U sólo requiere el ensayo a temperatura ambiente. No obstante se ha realizado el estudio a distintas temperaturas, para tener un conocimiento más amplio del comportamiento de los protectores, dentro del rango de temperaturas de diseño del vehículo.

5.1. Espumas de poliuretano PU-E 175

5.1.1. Efecto de la temperatura

Tomando como referencia la temperatura ambiente y definiendo para cada densidad, el incremento de efectividad como:

$$\Delta \text{efectividad} = - \frac{\overline{HIC(d)_T} - \overline{HIC(d)_{23^\circ C}}}{\overline{HIC(d)_{23^\circ C}}} \cdot 100$$

Tabla 1. Resultados obtenidos con espumas de poliuretano PU-E175.

MATERIAL		PROPIEDADES			
ESPUMA PU E175		Diseño flexible Comportamiento multidireccional Ciclo de desarrollo corto			
T (°C)	DENSIDAD (g/l)	ESPESOR (mm)	ESPESOR VALOR DE REFERENCIA	PICO G	HIC(d)
85	88	20	10	102	415
23		20		95	392
-16		20		99	427
85		25		82	355
23		25		81	352
-16		25		90	409
85		30		79	338
23		30		72	326
-16		30		83	378
85	80	15	10	139	551
23		15		123	489
-16		15		115	467
85		20		108	428
23		20		100	401
-16		20		94	400
85		25		90	365
23		25		82	348
-16		25		81	363
85	72	30	10	75	326
23		30		74	332
-16		30		80	368
85		15		145	588
23		15		127	506
-16		15		116	459
85		20		119	482
23		20		104	418
-16		20		95	388
85	72	25	10	98	404
23		25		86	358
-16		25		82	354
85		30		88	372
23		30		73	325
-16		30		74	334

Tabla 2. Incremento de efectividad por efecto de temperatura en ESPUMA PU E175.

DENSIDAD (g/l)	85°C	-16°C
88	-3.55%	-13.45%
80	-3.5%	-4.6%
72	-14%	+2.5%

Tabla 3. Incremento de la efectividad por efecto del espesor en ESPUMA PU E175.

DENSIDAD (g/l)	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm
88		referencia	+10.2%	+16.8%
80	-22%	referencia	+13.2%	+17.2%
72	-21%	referencia	+14.3%	+21%

Tabla 4. Incremento de la efectividad por efecto de la densidad en ESPUMA PU E175.

DENSIDAD (g/l)	HIC(d)	% Δ EFECTIVIDAD
88	356.67	referencia
80	360.33	-1.03%
72	368	-3.18%

donde $\overline{HIC(d)_T}$ es el valor medio del HIC(d) a la temperatura de ensayo y $\overline{HIC(d)_{23^\circ C}}$ es el valor medio del HIC (d) a la temperatura de 23°C.

Para las diferentes densidades se obtiene la tabla 2, en la que se observa que para bajas temperaturas, el mejor comportamiento se obtiene con la espuma de densidad 72 g/l, y de forma general el mejor comportamiento para cualquier temperatura se obtiene con la espuma de densidad 80 g/l.

5.1.2. Efecto del espesor

Tomando los datos obtenidos a temperatura ambiente y como espesor de referencia el de 20 mm y definiendo el incremento de efectividad como:

$$\Delta \text{efectividad} = - \frac{HIC(d)_s - HIC(d)_{20mm}}{HIC(d)_{20mm}} \cdot 100$$

De la tabla 1 se obtiene la tabla 3, en la que se observa que para todas las densidades el incremento de efectividad aumenta con el espesor.

5.1.3. Efecto de la densidad

De la tabla 1, tomando los resultados obtenidos a temperatura ambiente, hallando para cada densidad el valor medio del HIC(d), y tomando como referencia el valor medio del HIC(d) de la espuma de 88 g/l, se obtienen los resultados de la tabla 4, en la que se observa que el incremento de efectividad aumenta con el aumento de la densidad de la espuma.

Resumiendo se puede decir que la espuma PU E175 que resulta más eficiente es la de densidad 80 g/l, pues es la menos afectada por los cambios de temperatura y solamente tiene un incremento de efectividad de 1.03 inferior que la de densidad 88 g/l.

5.2. Espuma de poliuretano P3

De la tabla 5, operando del mismo modo que en el apartado 5.1, se obtienen las tablas 6, 7 y 8, de las que se obtiene como conclusión que la espuma PU P3 de densidad 72 g/l es la que mejores resultados ofrece, pues a parte de tener los valores más bajos del HIC(d), es el material que menos se ve afectado por la temperatura.

Tabla 5. Resultados obtenidos con la ESPUMA PU P3.

MATERIAL		PROPIEDADES			
ESPUMA PU P3		No produce efectos de rebote Diseño flexible Comportamiento multidireccional Ciclo de desarrollo corto			
T(°C)	DENSIDAD (g/l)	ESPEJOR (mm)	ESPEJOR V. REFERENCIA	PICO G	HIC(d)
85 23 -16	88	15	10	112	459
85 23 -16		15		113	462
85 23 -16		15		112	488
85 23 -16		20		92	394
85 23 -16		20		96	411
85 23 -16		20		101	445
85 23 -16		25		84	378
85 23 -16		25		91	400
85 23 -16		25		97	439
85 23 -16	80	30	10	79	362
85 23 -16		30		89	394
85 23 -16		30		100	450
85 23 -16		15		113	464
85 23 -16		15		115	468
85 23 -16		15		115	496
85 23 -16		20		96	408
85 23 -16		20		99	421
85 23 -16		20		100	447
85 23 -16	72	25	10	84	378
85 23 -16		25		88	388
85 23 -16		25		97	436
85 23 -16		30		82	372
85 23 -16		30		85	377
85 23 -16		30		98	440
85 23 -16		15		117	484
85 23 -16		15		109	453
85 23 -16		15		113	465
85 23 -16	72	20	10	94	410
85 23 -16		20		94	400
85 23 -16		20		99	429
85 23 -16	72	25	10	85	386
85 23 -16		25		88	391
85 23 -16		25		95	416
85 23 -16	72	30	10	81	375
85 23 -16		30		85	380
85 23 -16		30		96	417

Tabla 6. Incremento de la efectividad por efecto de la temperatura en ESPUMA PU P3.

DENSIDAD (g/l)	85°C	-16°C
88	+4.44%	-9.3%
80	+1.93%	-9.9%
72	-1.9%	-6.3%

Tabla 7. Incremento de la efectividad por efecto del espesor en ESPUMA PU P3.

DENSIDAD (g/l)	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm
88	referencia	+11.04%	+13.42%	+14.72%
80	referencia	+10.04%	+17.09%	+19.44%
72	referencia	+11.7%	+13.7%	+16.1%

Tabla 8. Incremento de la efectividad por efecto de la densidad en ESPUMA PU P3.

DENSIDAD (g/l)	HIC(d)	% ΔEFECTIVIDAD
88	416.75	-2.65%
80	413.5	-1.85%
72	406	Referencia

5.3. Espuma tipo celda

De la tabla 9, operando del mismo modo que en los apartados anteriores, se obtienen las tablas 10, 11 y 12.

En la tabla 10, se observa que la espuma menos afectada por la temperatura es la de 64 g/l, que tiene un incremento de efectividad del 19.52% a elevada temperatura y una pérdida de incremento de efectividad del 4.38% a baja temperatura.

Tabla 9. Resultados obtenidos con la espuma TIPO CELDA.

MATERIAL		PROPIEDADES				COMENTARIOS
ESPUMA TIPO CELDA		Excelente absorbedor de energía No cruje ni castaña				
T(°C)	DENSIDAD (g/l)	ESPEJOR (mm)	ESPEJOR V. REFERENCIA	PICO G	HIC(d)	
85	64	20	10	90	395	No quebradizo
23		20		111	475	Quebradizo parcial
-16		20		128	506	Quebradizo
85		25		82	376	No quebradizo
23		25		112	483	
-16		25		125	494	Quebradizo
85	56	15	10	111	445	No quebradizo
23		15		113	453	
-16		15		116	453	Quebradizo
85		20		93	387	No quebradizo
23		20		109	446	
-16		20		112	451	Quebradizo
85	48	25	10	73	353	No quebradizo
23		25		102	425	Quebradizo
-16		25		124	476	Quebradizo
85		15		124	484	No quebradizo
23		15		106	413	Quebradizo
-16		15		110	414	Quebradizo total
85	40	20	10	97	388	No quebradizo
23		20		93	386	Quebradizo
-16		20		104	419	Quebradizo
85		25		74	334	No quebradizo
23		25		89	378	
-16		25		107	406	Quebradizo
85	40	15	10	115	464	No quebradizo
23		15		91	376	
-16		15		97	382	Quebradizo total
85		20		93	388	No quebradizo
23		20		76	344	
-16		20		84	357	Quebradizo
85	40	25	10	72	337	No quebradizo
23		25		72	335	
-16		25		86	365	Quebradizo

Tabla 10. Incremento de la efectividad por efecto de la temperatura en espumas TIPO CELDA.

DENSIDAD (g/l)	85 °C	-16° C
64	+19.52%	-4.38%
56	+10.2%	-4.23%
48	-2.46%	-5.27%
40	-12.27%	-4.25%

Tabla 11. Incremento de la efectividad por efecto del espesor en espumas TIPO CELDA.

DENSIDAD (g/l)	15 mm	20 mm	25 mm
64		referencia	-1.68%
56	Referencia	+1.55%	+6.18%
48	Referencia	+6.54%	6.18%
40	Referencia	+8.51%	+9.84%

Tabla 12. Incremento de la efectividad por efecto de la densidad en espumas TIPO CELDA.

DENSIDAD (g/l)	HIC(d)	% ΔEFECTIVIDAD
64	479	-35.69%
56	441.33	-25.02%
48	392.33	-11.14%
40	353	Referencia

La espuma de 40 g/l, aunque se ve más afectada por la temperatura según se observa en la tabla 10, tiene un HIC(d) inferior a la de 48 gr/l, mejorando a ésta en un 11% de incremento de efectividad tal como se observa en la tabla 12.

La extremada rigidez de la espuma tipo celda de 64 g/l provoca que el HIC(d) sea tan elevado, sobrepasando en más de un 35% a la espuma de densidad de 40 g/l. Dicho material presenta una rotura frágil Fig. 6, que se ve acentuada a bajas temperaturas, pues la rigidez aumenta al disminuir la temperatura.

El incremento de efectividad que experimenta la espuma tipo celda a elevadas temperaturas se debe a que con el calor el material pierde rigidez, pasando a presentar una rotura dúctil, con lo que el material no se destroza.

5.4. Plásticos de seguridad

Los plásticos de seguridad son denominados materiales 3045 por el fabricante, seguido de otro número que corresponde con el espesor del material de partida expresado en milésimas de pulgada. De esta forma el material 3045-040 corresponde a un plástico de seguridad con un espesor de partida de 0.040 pulgadas. Se ha denominado espesor a la altura total del plástico una vez conformado tal como se observa en la Fig. 7.

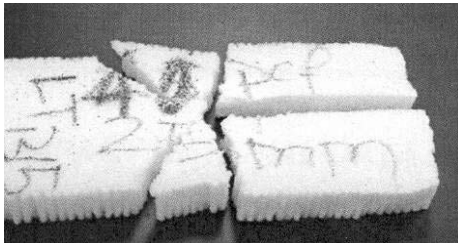


Fig. 6. Rotura frágil de la espuma tipo celda.

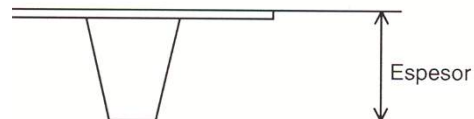


Fig. 7. Espesor y posición de ensayo de los plásticos de seguridad.

Tabla 13. Resultados obtenidos con los plásticos de seguridad.

MATERIAL		PROPIEDADES			
PLÁSTICOS DE SEGURIDAD		Poco pesados Reciclables Bajo costo			
T (°C)	TIPO	ESPESOR (mm)	ESPESOR VALOR DE REFERENCIA	PICO G	HIC(d)
85	3045-020	10	10	319	1240
23		10		221	802
-16		10		183	718
85	3045-030	10	10	217	814
23		10		145	565
-16		10		142	647
85	3045-040	10	10	174	662
23		10		139	596
-16		10		179	774
85	3045-030	15	10	233	856
23		15		122	452
-16		15		133	538
85	3045-040	15	10	184	670
23		15		100	417
-16		15		113	497
85	3045-50	15	10	139	521
23		15		103	456
-16		15		126	564
85	3045-030	20	10	267	972
23		20		128	449
-16		20		114	446
85	3045-40	20	10	162	584
23		20		86	350
-16		20		93	411
85	3045-050	20	10	127	464
23		20		78	358
-16		20		99	460
85	3045-060	20	10	110	407
23		20		82	384
-16		20		115	498

Tabla 14. Incremento de la efectividad por efecto de la temperatura. PLÁSTICOS DE SEGURIDAD.

ESPESOR (mm)	TIPO	85°C	-16°C
10	020	-54.61%	+10.47%
10	030	-44.07%	-14.51%
10	040	-11.07%	-29.87%
15	030	-89.38%	-19.03%
15	040	-60.67%	-19.18%
15	050	-14.25%	-23.68%
20	030	-116.48%	-067%
20	040	-66.86%	-17.43%
20	050	-29.61%	-28.49%
20	060	-5.99%	-29.69%

Tabla 15. Incremento de la efectividad por efecto del espesor. PLÁSTICOS DE SEGURIDAD.

TIPO	10 mm	15 mm	20 mm
020	802		
030	+25.84%	+0.67%	Referencia
040	+70.28%	+19.14%	Referencia
050		+27.37%	Referencia
060			384

Tabla 16. Incremento de la efectividad por efecto de la densidad. PLÁSTICOS DE SEGURIDAD.

TIPO	HIC(d)	% ΔEFECTIVIDAD
020	802	-108.85%
030	488.67	-27.26%
040	454.33	-18.32%
050	407	-6%
060	384	Referencia

Los plásticos de seguridad se han ensayado en la misma posición que tendrán una vez colocados en el vehículo, es decir, la superficie lisa pegada a la superficie no vista del techo y el cono enfrentado a la carrocería, obteniéndose los resultados de la tabla 13.

Operando en la tabla 13 del mismo modo que en los apartados anteriores, se obtienen las tablas 14, 15 y 16.

En la tabla 14 se observa que el material más efectivo a baja temperatura es el 3045-030 de 20 mm de espesor, pero de forma general el que mejor comportamiento tiene con la temperatura es el 3045-060 de 20 mm de espesor. La tabla 15 nos dice que el incremento de efectividad aumenta conforme disminuye el espesor y la tabla 16 que el material más efectivo es el 3045-060 de 20 mm de espesor.

A pesar de que estos materiales resultan muy eficientes a temperatura ambiente, pues presentan un HIC(d) muy bajo, tal como se puede observar en la tabla 13, sin embargo se ven muy afectados por los cambios de temperatura tabla 14, llegando a una pérdida media de incremento de efectividad del 50%.

5.5. Polipropileno expandido EPP Neopolen

De la tabla 17, operando de igual modo que en los apartados anteriores, se obtienen las tablas 18, 19 y 20.

En la tabla 18 se observa que el Neopolen de 72 g/l es el que mejor se comporta a elevada temperatura, debido a que al ser un material de elevada rigidez a temperatura ambiente, con el aumento de temperatura gana ductilidad, haciendo que disminuyan las tensiones en el impacto. Lo contrario ocurre en el Neopolen de 40 g/l. De forma general el que mejor se comporta ante variaciones de temperatura es el Neopolen de 72 g/l.

En la tabla 19 se observa que el incremento de efectividad aumenta con el aumento del espesor. La tabla 20 nos dice que el incremento de efectividad disminuye con el aumento de la densidad.

5.6. Polipropileno expandido EPP Morval

Operando en la tabla 21 del mismo modo que en los apartados anteriores, se obtienen las tablas 22, 23 y 24.

En la tabla 22 se observa, que al ser el EPP Morval un material blando, el aumento de temperatura le hace perder en torno a un 40% de incremento de efectividad, mientras que las bajas temperaturas le afectan muy poco. La tabla 24 nos dice que el mayor incremento de efectividad se consigue con el EPP morval de densidad 40 g/l.

Tabla 17. Resultados obtenidos con el EPP NEOPOLEN.

MATERIAL		PROPIEDADES			
EPP NEOPOLEN		Amplio surtido de densidades Reciclable Menos crujiente que EPS y GECET (*) Produce rebotes			
T (°C)	DENSIDAD (g/l)	ESPESOR (mm)	ESPESOR VALOR DE REFERENCIA	PICO G	HIC(d)
85 23 -16	40	15	10	187	804 (*)
		15		122	506
		15		118	487
85 23 -16		20		133	579
		20		96	422
		20		107	455
85 23 -16		25		124	548
		25		82	377
		25		87	388
85 23 -16	56	15	10	166	716
		15		117	497
		15		117	496
85 23 -16		20		133	575
		20		98	431
		20		109	466
85 23 -16		25		111	490
		25		88	405
		25		103	447
85 23 -16	72	15	10	128	560
		15		116	514
		15		133	576
85 23 -16		20		116	504
		20		112	492
		20		128	558
85 23 -16		25		95	433
		25		106	475
		25		126	545

Tabla 18. Incremento de la efectividad por efecto de la temperatura. EPP NEOPOLEN.

DENSIDAD (g/l)	85°C	-16°C
72	-1.08%	-13.37%
56	-33.61%	-5.70%
40	-47,97%	-1.91%

Tabla 19. Incremento de la efectividad por efecto del espesor. EPP NEOPOLEN.

DENSIDAD (g/l)	15 mm	20 mm	25 mm
72	referencia	+4.28%	+7.59%
56	referencia	+13.28%	+18.51%
40	referencia	+16.6%	+25.49%

Tabla 20. Incremento de la efectividad por efecto de la densidad. EPP NEOPOLEN.

DENSIDAD (g/l)	HIC(d)	% ΔEFECTIVIDAD
72	493.67	-13.49%
56	444.33	-2.14%
40	435	Referencia

Tabla 21. Resultados obtenidos con el EPP MORVAL.

MATERIAL		PROPIEDADES			
EPP MORVAL		Amplio surtido de densidades Reciclable Menos crujiente que EPS y GECET			
T (°C)	DENSIDAD (g/l)	ESPESOR (mm)	ESPESOR VALOR DE REFERENCIA	PICO G	HIC(d)
85	40	15	10	184	775
23		15		124	507
-16		15		113	465
85		20		143	613
23		20		98	416
-16		20		99	426
85		25		111	475
23		25		78	362
-16		25		111	475
85	48	15	10	180	756
23		15		119	490
-16		15		116	481
85		20		135	576
23		20		105	443
-16		20		104	445
85		25		101	436
23		25		84	380
-16		25		97	423

Tabla 22. Incremento de la efectividad por efecto de la temperatura. EPP MORVAL.

DENSIDAD (g/l)	85°C	-16°C
48	-34.65%	-2.74%
40	-44.98%	-6.30%

Tabla 23. Incremento de la efectividad por efecto del espesor. EPP MROVAL.

DENSIDAD (g/l)	15 mm	20 mm	25 mm
48	referencia	+9.59%	+22.45%
40	referencia	+17.95%	+28.60%

Tabla 24. Incremento de la efectividad por efecto de la densidad. EPP MORVAL.

DENSIDAD (g/l)	HIC(d)	%ΔEFECTIVIDAD
48	437.67	-2.18%
40	428.33	Referencia

5.7. Poliestireno / óxido de polifenileno (Gecet)

De la tabla 25 se obtienen las tablas 26, 27 y 28.

La tabla 26 nos indica que el Gecet se comporta muy bien frente a cambios de temperatura. En la tabla 27 se observa que el incremento de efectividad aumenta con el aumento del espesor del material. En la tabla 28 se observa que el incremento de efectividad aumenta con el aumento de la densidad del material.

Tabla 25. Resultados obtenidos con los GECET.

MATERIAL		PROPIEDADES			
GECET		Excelente absorbedor de energía Estabilidad dimensional Reciclable			
T (°C)	DENSIDAD (g/l)	ESPESOR (mm)	ESPESOR VALOR DE REFERENCIA	PICO G	HIC(d)
85	32	15	10	132	530
23		15		145	580
-16		15		112	469
85		20		105	425
23		20		112	449
-16		20		105	427
85		25		79	351
23		25		80	355
-16		25		84	369
85		30		69	328
23		30		74	342
-16		30		78	357
85	40	15	10	132	528
23		15		121	486
-16		15		136	546
85		20		97	401
23		20		99	410
-16		20		99	413
85		25		80	353
23		25		84	369
-16		25		85	373
85		30		72	339
23		30		78	357
-16		30		72	339

Tabla 26. Incremento de la efectividad por efecto de la temperatura. GECET.

DENSIDAD (g/l)	85°C	-16°C
32	+5.33	+6.03
40	+0.06	-3.02

Tabla 27. Incremento de la efectividad por efecto del espesor. GECET.

DENSIDAD (g/l)	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm
32	referencia	+22.59%	+38.79%	+41.03%
40	referencia	+15.64%	+24.07%	+26.54%

Tabla 28. Incremento de la efectividad por efecto de la densidad. GECET.

DENSIDAD (g/l)	HIC(d)	%Δ EFECTIVIDAD
32	431.5	-6.41%
40	405.5	Referencia

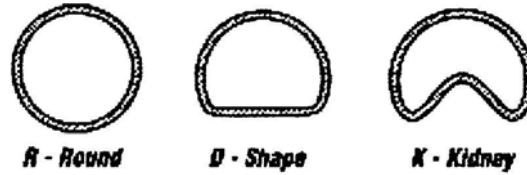


Fig. 8. Perfiles Cleavaflex ensayados.

5.8. Tubos Cleavaflex

Se han ensayado los perfiles con la geometría mostrada en la Fig. 8. El siguiente ejemplo ilustra el modo de designación de estos perfiles:

Designación: 14 P-A-P Kc

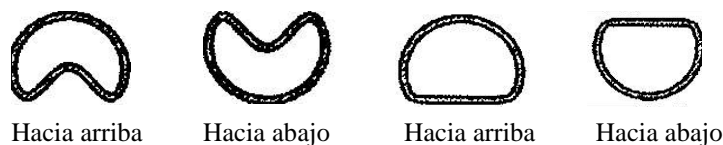
Donde: 14 indica el diámetro del tubo, P indica lámina de papel, A indica lámina de aluminio, S indica lámina de acero. Kc nos indica la geometría del tubo.

De la tabla 29 se obtiene la Fig. 9 en la que se observa:

1. La posición del tubo no influye en el incremento de la efectividad, por lo que se debe optar por aquella posición que sea más sencilla de colocar.
2. La forma redonda es menos efectiva.
3. El aluminio presenta menos incremento de efectividad que el acero
4. La variación del diámetro y forma en el aluminio prácticamente no influye en el incremento de efectividad.
5. En el acero el aumento de diámetro mejora el incremento de efectividad.

Tabla 29. Resultados obtenidos con los tubos CLEVAFLEX.

MATERIAL		PROPIEDADES			
TUBOS CLEVAFLEX		Bajo peso Flexibilidad en el diseño Fácil de instalar			
T(°C)	DENOMINACION	ESPESESOR VALOR DE REFERENCIA	PICO G	HIC(d)	COMENTARIOS
23	14 P-A-P Kc	10	165	574	Hacia arriba
	14 P-A-P Kc		172	583	Hacia abajo
	14 P-S/S-P Kc		126	483	Hacia arriba
	14 P-S/S-P Kc		122	476	Hacia abajo
	18 P-S/S-P Kc		104	406	Hacia arriba
	18 P-S/S-P Dc		106	408	Hacia abajo
	16 P-A/A-P Dc		170	567	Hacia arriba
	16 P-A/A-P Dc		175	583	Hacia abajo
	22 P-S/S-P Dc		72	334	Hacia arriba
	22 P-S/S-P Dc		73	341	Hacia abajo
	20 P-S-P Rs		165	577	
85	24 P-A/A-P Rs		163	566	
23			157	542	
-16			151	515	



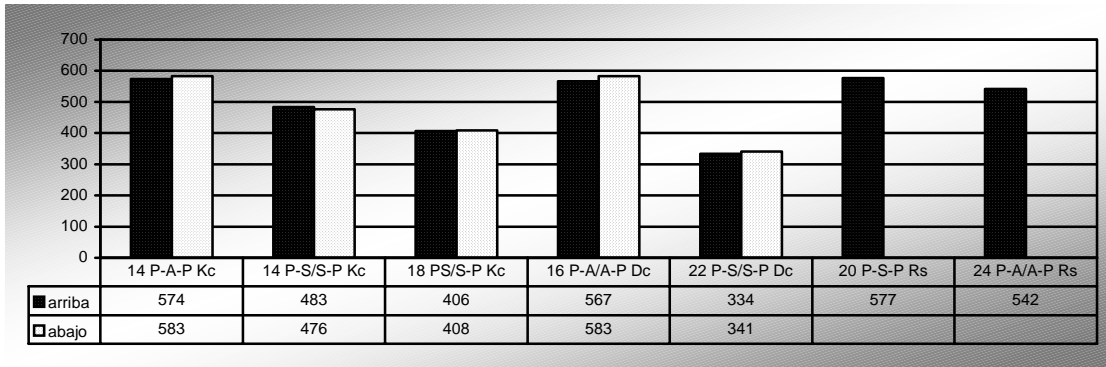


Fig. 9. Resultados de los tubos Clevaflex.

5.9. Tubos Oflex

Los tubos Oflex se denominan de la siguiente forma: alto x ancho – VXYZ

En esta denominación: alto x ancho son las dimensiones del tubo expresadas en mm, V = número de capas de metal empleadas en el tubo, XY = espesor de la capa de metal expresada en μm , Z = número de corrugaciones del tubo por unidad de longitud (este dato da una idea de la rigidez del tubo; Z toma sólo tres valores, 1, 2 ó 3, en orden creciente de rigidez).

Los resultados de la tabla 30 se representan en el gráfico de la figura 10. De la que se obtienen las si-

Tabla 30. Resultados obtenidos con los tubos OFLEX.

T (°C)	DENOMINACIÓN	ESPESOR VALOR DE REFERENCIA	PICO G	HIC(d)
	10 x 20 - 1133	10	175	649
	10 x 20 - 1933		175	647
	13 x 20 - 1102	10	111	537
	13 x 20 - 2103		112	484
	13 x 30 - 2803		106	521
	15 x 20 - 2103	10	116	456
	15 x 20 - 2803		96	465
	19 x 19 - 2102	10	94	365
	19 x 19 - 2802		76	382

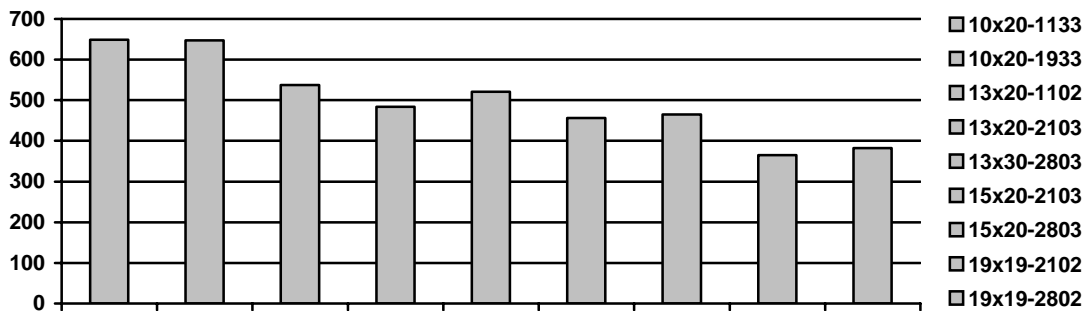


Fig. 10. Resultados de los tubos Oflex.

güentes conclusiones:

1. Los tubos cuadrados son los de mayor eficacia y ésta disminuye al aumentar la relación ancho / alto del tubo.
2. El HIC(d) disminuye al aumentar el espesor de la lámina de metal.

5.10. Comparación de resultados

Las figuras 11, 12, 13 y 14 muestran ordenadas, de menor a mayor HIC(d), a la temperatura ambiente, los protectores estudiados para los espesores 30, 25, 20 y 15 mm.

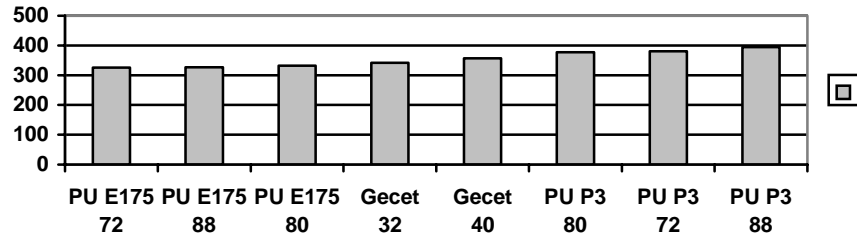


Fig. 11. Comparación de resultados para el espesor de 30 mm.

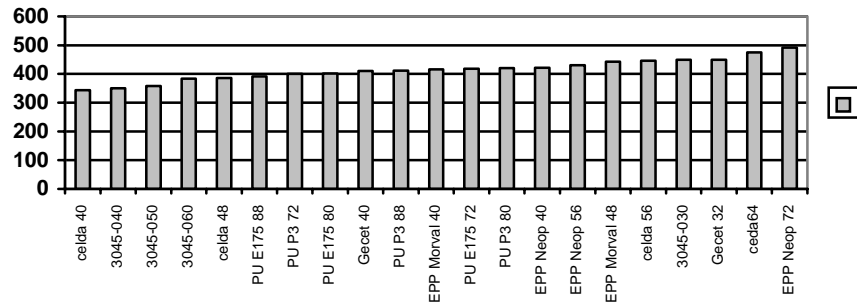


Fig. 12. Comparación de resultados para el espesor de 25 mm.

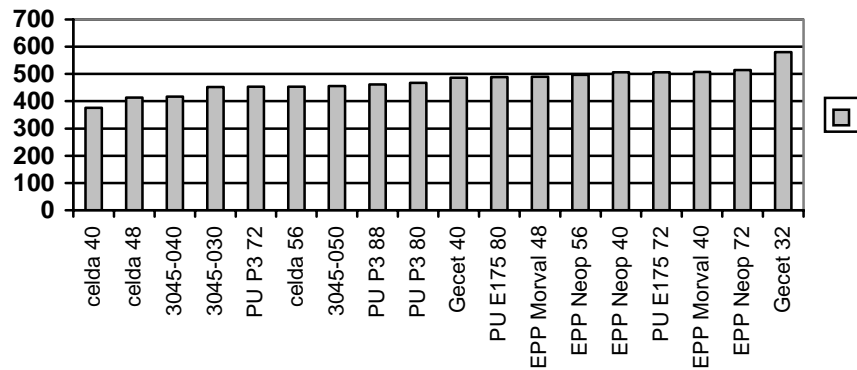


Fig. 13. Comparación de resultados para el espesor de 20 mm.

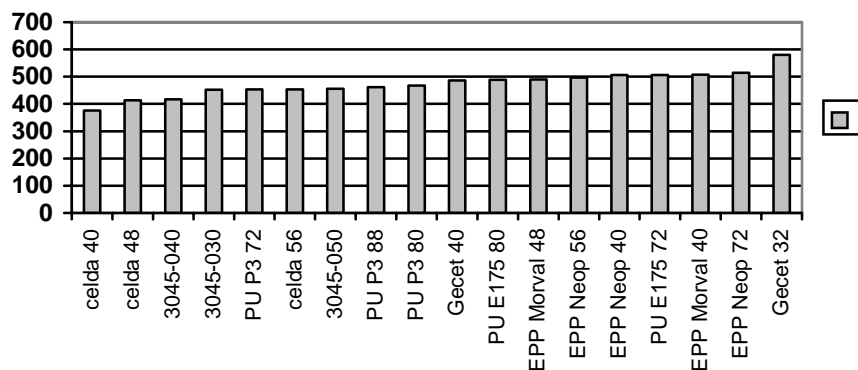


Fig. 14. Comparación de resultados para el espesor de 15 mm.

6. CONCLUSIONES

1. El incremento de efectividad aumenta a medida aumenta el espesor del protector, excepto en los tubos clevaflex con láminas de aluminio, en los cuales la variación del diámetro y de la forma del tubo, prácticamente no influye en el incremento de la efectividad. En los plásticos de seguridad el incremento de efectividad aumenta con el aumento del espesor de la lámina de partida, pero el incremento de efectividad disminuye con el aumento del espesor de termoconformado.
2. Las espumas no recuperables PU P3, tipo celda y Gecet, y las espumas recuperables PU E175 y EPP Neopolen de 72 g/l, así como los tubos, se comportan bien ante variaciones de temperatura. Sin embargo las espumas recuperables EPP Morval, el resto de las densidades de la espuma EPP Neopolen y los plásticos de seguridad se ven muy afectados por las variaciones de temperatura.
3. La densidad ejerce poca influencia en las espumas PU E175, PU P3, y EPP Morval, mientras que en las espumas EPP Neopolen, Gecet y tipo celda, el incremento de efectividad aumenta al disminuir la densidad.
4. Independientemente del espesor y de la temperatura el material con mayor poder de absorción de energía es el de tipo celda de 40 g/l.
5. En los tubos Clevaflex la posición del tubo no tiene influencia sobre el incremento de efectividad.
6. La sección cuadrada de los tubos Oflex es la de mayor eficacia, de modo que ésta disminuye cuanto más se aparta de dicha sección.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Title 49- Transportation. Chapter V – NHTSA, “Code of Federal Regulation”. part 571. Cite: 49 CFR 571.201. Revised as of October 1, 2001.
- [2] Helen A. Rychlewski, P. Michael Miller II. “A General Discussion on Interior Design Alternatives in Response to FMVSS 201U- Upper Interior Head Impact Protection”. *SAE Technical Paper 982348*. September 1998.
- [3] Jawahar Kamarajan, Rajkumar Rajagopalan and Vikas Gupta. “Effects or Múltiple Impacts on Head Injury Criteria”. *SAE Technical Paper 1999-01-0297*.
- [4] Josh Ullrich, Dave Emanuel, Walter Fong, Guy Nusholtz, Mansoor Chaudhry and Sawn Williams. “Comparison of energy Management Materials for Head Impact Protection”. *SAE Technical Paper 970159*. September 1997.
- [5] Eddy R Finch, A Mani and Karthik Kumar. “Head Impact Protection Using Light Weight Composite Tubular Structure”. *SAE Technical Paper 2000-01-0628*.

- [6] Edward A. Laabs, Paul J. Burke, Steven J. Rogers, Helen A. Rychlewski. "The Fast Path System: Simplifying the Task of Identifying Successful Material / Design Combinations for Efficient Energy Management for Automotive Head Impact Requirements". *SAE Technical Paper* 980970. February 1998.
- [7] Enamul Haque, Jawahar Kamarajan and Guoyu Yang. "Development and Characterization of New Headliner Material to Meet FMVSS 201 Requirements". *SAE Technical Paper* 2000-01-0624.

COMPARATIVE STUDY OF MATERIALS IN RESPONSE TO FMVSS 201U UPPER INTERIOR HEAD IMPACT PROTECTION

Abstract – The purpose of this paper is to create a data base of materials used as countermeasures to meet FMVSS 201 Requirements. To do the experiments we have constructed the Drop Test Machine, which with a common baseline allows us to carry out a comparative study of the materials tested. The following conclusions have been drawn from the study: generally the effectiveness of the countermeasure increases with its thickness. Non recoverable foams behave well under temperature variations. The reduction in density of the foam increases its effectiveness. Tubular structures with steel sheets are more efficient than tubular structures with aluminium sheets. In round tubular structures, the position of the tube has no influence on its effectiveness. Within the rectangular tubular structures, efficiency increases when closer to the square section.

Keywords – Countermeasures, energy absorbing, FMVSS 201U, head impact protection.

