

A N E X O S

Desarrollo de un protocolo de control de calidad mecánica de las piezas de vidrio de Murano

Desarrollo de un protocolo de control de calidad mecánica de las piezas de vidrio de Murano

Viabilidad del uso de métodos de métodos de excitación vibratoria por impulso

1. Introducción

Uno de los aspectos que tradicionalmente ha limitado el empleo de la lámina de vidrio en la construcción es el relativo a su resistencia mecánica. Esta propiedad, que depende de su composición como de su proceso de elaboración, ha alcanzado excelentes propiedades de resistencia en las técnicas de producción industrial mediante las técnicas de flotado, templado y laminado.

En el tema que nos ocupa, de los vidrios opales, existe un alto componente de ejecución de tipo artesanal o poco industrializado, lo cual puede dificultar el mantenimiento de estándares de calidad en el producto.

En ese sentido, como parte de este trabajo nos enfocamos en las propiedades mecánicas del vidrio opal, participando en un estudio para el desarrollo de un sistema de control de calidad de las piezas de vidrio opalino (vidrio de Murano).

En dicho estudio hemos colaborado con los arquitectos estructuralistas Marc Cuesta y Oriol Palou, de la firma POTI-POTI.^{ORG}

Antecedentes

La motivación de estos arquitectos, para la realización de dicho estudio parte la aparición de patologías en la aplicación de la técnica del trencadis relativas a la resistencia mecánica del vidrio. Estas anomalías se resumen en dos tipos de lesiones:

- Aparición de grietas en los extremos, que posteriormente crecen con el tiempo.
- Deslaminación/ descamación de las piezas

Dado que el sistema de fabricación de las piezas es muy artesanal, se haría necesario evaluar la totalidad de las piezas. En ese sentido se hace necesario elaborar un sistema d evaluación de estas para poder descartar las que no se adapten a las cualidades i características requeridas.

Así se procura un sistema que sea:

- Barato
- Rápido
- No destructivo
- Capaz de evaluar la elasticidad, la tensión de ruptura, así como la homogeneidad del material.

Tras una breve campaña de pruebas se determina que la vibración por impulso para determinar el MOE podría ser adecuado y reunir las características requeridas. Así se decide emprender una investigación para la elaboración y desarrollo de un protocolo de control de calidad de las piezas de vidrio de Murano con esta técnica.

Se encarga la elaboración de un estudio de viabilidad del uso de métodos de excitación vibratoria por impulso para desarrollar un protocolo de control de calidad mecánica para la recepción de piezas de vidrio de murano a ser aplicados en trencadis.

Objetivos del estudio

- Desarrollo de un breve marco teórico sobre la relación entre la frecuencia fundamental de vibración de una pieza y el modulo de elasticidad del material que la forma.
- Caracterización de vidrios del tipo float con métodos de excitación vibratoria por impulso.
- Caracterización de piezas de vidrio de Murano con métodos de excitación vibratoria con impulso a partir de 24 piezas de un mismo color.
- Comparativa entre el vidrio tipo float y el vidrio de Murano de color 2770.
- Análisis de la correspondencia entre la clasificación visual y la elasticidad (MOE) del material
- Determinación de la viabilidad del método y detección de los problema a superar
- Establecer las recomendaciones y caminos a seguir.

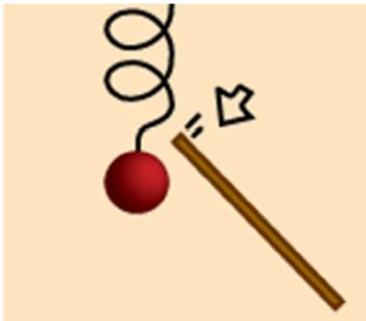
2. El método de ensayo.

El ensayo de excitación de la vibración por impulso para determinar el MOE (modulo de Young) se basa en el fenómeno de las frecuencias de resonancia. Cuando un objeto es golpeado, este tiene una tendencia a vibrar a sus frecuencias naturales o de resonancia. Así entonces:

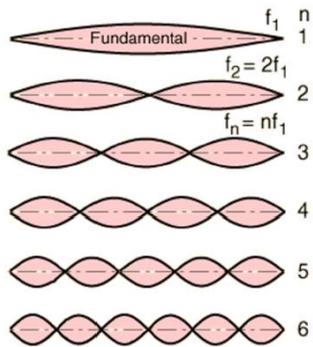
- **Es fácil conseguir que un objeto vibre a sus frecuencias de resonancia, pero difícil conseguir que vibre en otras frecuencias.** Por ejemplo, un columpio es un péndulo, un sistema resonante con una única frecuencia de resonancia. Con un suave impulso al columpio en cada venida, se puede mantener la amplitud de la oscilación. Si se intenta forzar para una oscilación de doble frecuencia, se encontrara que es muy difícil.



- **Un objeto que vibra, tomara sus frecuencias de resonancia de una excitación completa. Vibra a estas frecuencias “filtrando” finalmente otras frecuencias presentes en la excitación.** Si se golpea una masa que pende de un resorte con un palo, el movimiento inicial puede ser complejo, pero la respuesta principal será balancear arriba y debajo de su respuesta natural. El golpe con el palo es una excitación compleja con muchos componentes de frecuencias, pero aparece una respuesta a su frecuencia natural.

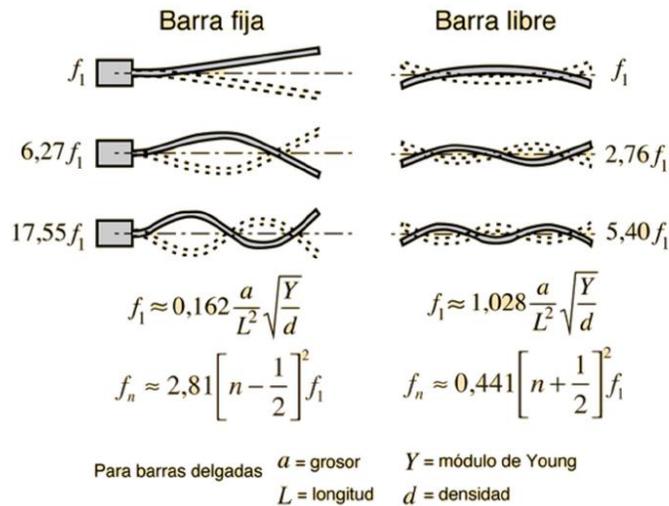


- **La mayoría de los objetos que vibran tienen múltiples frecuencias de resonancia o modos.** Por ejemplo, la vibración ideal de una cuerda se producirá a su frecuencia a fundamental y a todos los armónicos de esta frecuencia al mismo tiempo.



Las frecuencias de resonancia de un objeto dependen de características físicas del mismo (como son la geometría, la masa y el modulo de Young) y de las condiciones de contorno a las que está sometido. Los diferentes modos de vibración son múltiplos de el modo 1 o frecuencia fundamental.

A continuación, a modo de ejemplo, se analizan los casos de una barra empotrada en un extremo y de una barra libre:



El ensayo

El protocolo de ensayo de las piezas de vidrio opalino (vidrio de Murano), que se había de seguir se basa en el ensayo establecido por la **UNE-EN ISO 12650-1: Métodos de ensayo para productos refractarios – Determinación del modulo de Young por excitación de la vibración por impulso.**

El ensayo consiste en excitar mecánicamente mediante un único golpe elástico realizado con un martillo, una probeta del material a caracterizar. La probeta habrá de ser de un material homogéneo e isótropo y cumplir con unas condiciones de forma y geometría determinadas:

- Para ser considerado un material homogéneo, la dimensión mas pequeña de la probeta ha de ser igual o superior a cuatro veces la medida del grano o partícula mas grande.
- Las probetas han de ser simples barras finas de sección transversal o circular con una relación mínima de 3 entre la longitud y el grosor o diámetro de la sección transversal.

La probeta se dispondrá sobre dos apoyos lineales situados en los nodos de la pieza (0.224L). Los soportes sirven para aislar las probetas de vibraciones externas sin limitar la vibración en el modo deseado. Estos elementos pueden ser rígidos o flexibles y han de estar realizados con materiales estables a la temperatura del ensayo. En caso de usar soportes rígidos, estos han de tener aristas afiladas o cilíndricas y deben asentarse sobre una cama aislante para evitar que la probeta capte vibraciones parasitas. En el caso de usar soportes flexibles, se usaran tiras planas de espumas o de goma.

Una vez la probeta esta correctamente dispuesta sobre los calzos esta es excitada con un martillo de punta metálica redondeada y mango realizado con una barra flexible de polímero. Una vez la pieza comienza a vibrar la señal vibratoria es recogida con un transductor. Existen dos tipos de transductores:

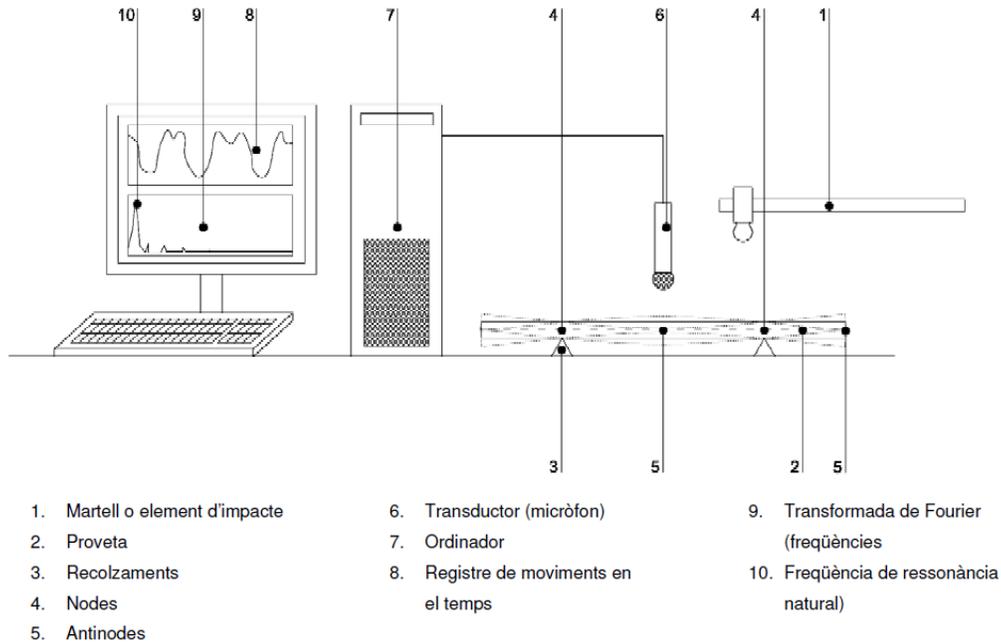
- Transductores de contacto: Se trata de acelerómetros que usan dispositivos piezoeléctricos o extensómetros para medir la vibración. Es muy importante que estén bien adheridos a la probeta.
- Transductores sin contacto: Existen de tipo magnético, laser o electrostáticos, pero los más comunes son los micrófonos acústicos. En el caso que nos ocupa se usara un micrófono apto para registrar la voz humana.

Una vez recogida la señal, esta se envía al ordenador que se encarga de amplificarla y registrar los desplazamientos de la membrana del micrófono en el tiempo. A partir de aquí, con un software que permite el cálculo de la transformada rápida de Fourier se pueden encontrar las frecuencias de vibración de la pieza y determinarse la frecuencia fundamental.

Para determinar la frecuencia de resonancia fundamental se realizan diversas lecturas hasta que se obtengan 5 lecturas consecutivas con una dispersión igual o menor al 1%. Se tendrá como frecuencia de resonancia fundamental la media de estas cinco.

Finalmente, se pesaran y medirán las dimensiones de la probeta para tener el resto de datos necesarios para obtener el MOE a partir de la formulación recogida en la norma.

A continuación se muestra un esquema de las diversas partes de que consta el sistema:



Mejoras al ensayo

Después de mucha experimentación se han incorporado diversas mejoras al proceso de ensayo respecto a los ensayos iniciales:

- Se sustituyó el martillo metálico de punta redondeada por dos pelotas de goma: El martillo metálico transmitía mucha energía a la pieza analizada de forma que las frecuencias de resonancia que se leían correspondían a modos altos (por encima de la frecuencia fundamental). Debido a los niveles de energía altos, los modos de frecuencia leídos (los preponderantes) eran muy disparados ya que cambiaban muy a menudo. Se ha escogido dos tipos de pelotas después de múltiples pruebas:

- La Bola A es una pelota de golf de 46g de masa.
- La Bola B es una pelota de goma maciza de 13g de masa.

Estos dos objetos tienen una masa menor que el martillo empleado inicialmente. Además, el estar compuestos de goma hace que las diferencias de intensidad entre diferentes golpes se suavicen y que la transmisión de energía por impacto siga más suave y elástica dando como resultado frecuencias de vibración más bajas y sostenidas.



- También se han recubierto los apoyos lineales con goma EVA: al tratarse de un material elástico, permite que las piezas de vidrio que no son perfectamente planas se calcen mejor al mismo tiempo que deja que estas vibren más libremente como un gong.



3. Modelo Teórico: Formula de la UNE

A continuación se expone la formulación que se ha utilizado para realizar todos los cálculos del presente informe:

$$E = 0.9465 \cdot \left[\frac{mf_1^2}{b} \right] \cdot \left[\frac{L^3}{t^3} \right] \cdot T_1$$

$$f_1 = \sqrt{\frac{E \cdot b}{0.9465 \cdot \left[\frac{L^3}{t^3} \right] \cdot T_1 \cdot m}}$$

On:

- m és la massa de la proveta en grams.
- b és l'ample de la proveta en mil·límetres.
- L és la longitud de la proveta en mil·límetres.
- t és el gruix de la proveta en mil·límetres
- f₁ és la freqüència de ressonància fonamental de vibració a flexió en hertz.
- T₁ és el factor de correcció del mode fonamental de vibració a flexió per tenir en compte el gruix finit de la barra, el coeficient de Poisson, etc.
- μ és el coeficient de Poisson

Si $\frac{L}{t} \geq 20$ llavors T₁ es pot calcular:

$$T_1 = 1 + 6.585 \cdot \left[\frac{t}{L} \right]^2$$

Si $\frac{L}{t} < 20$ llavors T₁ es pot calcular:

$$T_1 = 1 + 6.585 \cdot [1 + 0.0752\mu + 0.8109\mu^2] \cdot \left[\frac{t}{L} \right]^2 - 0.868 \left[\frac{t}{L} \right]^4 - J$$

On:

$$J = \frac{\left[8.34 \cdot (1 + 0.2023\mu + 2.173\mu^2) \cdot \left(\frac{t}{L} \right)^4 \right]}{\left[1 + 6.338 \cdot (1 + 0.1408\mu + 1.536\mu^2) \cdot \left(\frac{t}{L} \right)^2 \right]}$$

4. Evaluación de los ensayos realizados en piezas normalizadas

El objetivo de este capítulo es determinar cuáles ensayos permiten leer la frecuencia de vibración fundamental de las piezas y módulos de Young dentro del rango del vidrio. También se establecerá cuáles son las metodologías de ensayos comunes más adecuados para los vidrios tipo Float y de Murano que permitan su estudio comparado.

En primer lugar se ha trabajado con piezas prismáticas. Las piezas de vidrio de Murano que se han cortado para regularizarlas se denominaran piezas normalizadas.

Los ensayos en piezas normalizadas de vidrio de Murano

Para poder aplicar la formulación de la UNE-EN ISO 12680-1, se han cortado todas las piezas e forma que tengan una forma prismática regular de 326 x 240 x 10mm y poder así obtener resultados consistentes y fiables. Se han realizado según las siguientes series de ensayos:

- 10 percusiones en 24 piezas normalizadas en la dirección X por la cara superior con la bola A en el antinodo central.
- 10 percusiones en 24 piezas normalizadas en la dirección X por la cara superior con la bola A en el antinodo extremo.
- 10 percusiones en 24 piezas normalizadas en la dirección X por la cara superior con la bola B en el antinodo central.
- 10 percusiones en 24 piezas normalizadas en la dirección X por la cara inferior con la bola A en el antinodo central.
- 10 percusiones en 24 piezas normalizadas en la dirección X por la cara inferior con la bola A en el antinodo extremo.
- 10 percusiones en 24 piezas normalizadas en la dirección X por la cara inferior con la bola B en el antinodo central.
- 10 percusiones en 24 piezas normalizadas en la dirección Y por la cara superior con la bola A en el antinodo central.
- 10 percusiones en 24 piezas normalizadas en la dirección Y por la cara superior con la bola B en el antinodo central.
- 10 percusiones en 24 piezas normalizadas en la dirección Y por la cara inferior con la bola A en el antinodo central.
- 10 percusiones en 24 piezas normalizadas en la dirección Y por la cara inferior con la bola B en el antinodo central.

En total se realizaron 2400 percusiones. Previamente se habían hecho ensayos con las piezas sin cortar para poder los contrastar más adelante.

Los ensayos realizados en piezas normalizadas de vidrio tipo FLOAT

Para poder aplicar la formulación de la UNE-EN ISO 12680-1 y poder comparar los resultados con los obtenidos en las piezas normalizadas de vidrio de Murano, se han cortado todas las piezas de forma que tengan una forma prismática regular de 326mm x 240 mm x 10 mm similar a las piezas de vidrio de Murano. Se han realizado las siguientes series de ensayos:

- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección X por la cara superior con la bola A en el antinodo central.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección X por la cara superior con la bola A en el antinodo extremo.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección X por la cara superior con la bola B en el antinodo central.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección X por la cara inferior con la bola A en el antinodo central.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección X por la cara inferior con la bola A en el antinodo extremo.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección X por la cara inferior con la bola B en el antinodo central.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección Y por la cara superior con la bola A en el antinodo central.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección Y por la cara superior con la bola A en el antinodo extremo.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección Y por la cara superior con la bola B en el antinodo central.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección Y por la cara inferior con la bola A en el antinodo central.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección Y por la cara inferior con la bola A en el antinodo extremo.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección Y por la cara inferior con la bola B en el antinodo central.

En total se han realizado 264 percusiones en 2 probetas de vidrio float.

Evaluación de los ensayos a partir de los resultados

Sabemos que el vidrio es un material isótropo (en principio) y homogéneo. A partir de la bibliografía consultada sabemos que el MOE del vidrio se puede encontrar entre 40GPa i 90GPa. Un MOE representativo de un vidrio típico sería 70GPa. A partir de conocer el orden de magnitud de los resultados que estamos buscando podemos evaluar si los ensayos nos permiten leer la frecuencia fundamental correctamente o no.

AVALUACIÓ IDONEÏTAT ASSAIG A PARTIR DE RESULTATS								
TIPUS VIDRE	DIRECCIÓ	CARA	BOLA	ANTINODE	CODI ASSAIG	FREQUENCIA MITJA PIASTRES (Hz)	MOE (Pa)	AVALUACIÓ
MURANO	DX	SUP	BA	AC	DXSUPBAAC	895,77	202.909.263.557,31	KO
MURANO	DX	SUP	BA	AE	DXSUPBAAE	487,36	60.063.683.405,18	OK
MURANO	DX	SUP	BB	AC	DXSUPBBAC	493,32	61.541.898.041,75	OK
MURANO	DX	INF	BA	AC	DXINFBAAC	898,14	203.983.415.002,30	KO
MURANO	DX	INF	BA	AE	DXINFBAAE	491,2	61.012.852.014,38	OK
MURANO	DX	INF	BB	AC	DXINFBBAC	493,46	61.577.546.088,52	OK
MURANO	DY	SUP	BA	AC	DYSUPBAAC	925,83	64.002.578.626,98	OK
MURANO	DY	SUP	BB	AC	DYSUPBBAC	496,54	18.409.972.589,19	KO
MURANO	DY	INF	BA	AC	DYINFBAAC	920,72	63.298.900.432,46	OK
MURANO	DY	INF	BB	AC	DYINFBBAC	493,33	18.172.396.389,34	KO
FLOAT	DX	SUP	BA	AC	DXSUPBAAC	962,65	246.843.967.667,20	KO
FLOAT	DX	SUP	BA	AE	DXSUPBAAE	504,93	67.912.237.216,48	OK
FLOAT	DX	SUP	BB	AC	DXSUPBBAC	495,02	65.272.640.208,83	OK
FLOAT	DX	INF	BA	AC	DXINFBAAC	968,63	249.920.291.961,26	KO
FLOAT	DX	INF	BA	AE	DXINFBAAE	497,84	66.018.440.950,30	OK
FLOAT	DX	INF	BB	AC	DXINFBBAC	492,42	64.588.776.193,22	OK
FLOAT	DY	SUP	BA	AC	DYSUPBAAC	506,06	20.142.735.463,58	KO
FLOAT	DY	SUP	BA	AE	DYSUPBAAE	1010,5	80.313.224.455,85	OK
FLOAT	DY	SUP	BB	AC	DYSUPBBAC	510,09	20.464.825.502,94	KO
FLOAT	DY	INF	BA	AC	DYINFBAAC	510	20.457.604.534,84	KO
FLOAT	DY	INF	BA	AE	DYINFBAAE	1003,51	79.205.955.241,84	OK
FLOAT	DY	INF	BB	AC	DYINFBBAC	507,11	20.226.408.599,85	KO

Sobre los ensayos

Ensayos en dirección X (DX)

Como se puede ver en la tabla inferior, tanto con vidrios tipo Float como con vidrios de Murano, los ensayos DXSUPBAAC y DXINFBAAC dan resultados de MOE de un orden de magnitud muy superior a los esperados. Analizando las frecuencias es posible comprobar que se está recogiendo el modo 2 de vibración. La causa de este problema es que se transmite un exceso de energía por impacto a la pieza así provoca que se exciten modos de resonancia superiores a la frecuencia fundamental.

Por tanto, se puede constatar que, para ensayos en la dirección X en el antinodo central, es más adecuado un objeto de golpeo de masa inferior que la bola B. Con la bola A se recogen frecuencias del modo 2.

En caso de querer usar la bola A para realizar ensayos en la dirección DX, se pueden realizar lecturas de la frecuencia de resonancia fundamental de las piezas picando en el antinodo extremo. Como es posible comprobar en la tabla inferior, no hay diferencias de resultados usando la bola B en el antinodo central y la bola A en el antinodo extremo.

COMPARATIVA ENTRE ASSAIG EN ANTINODE CENTRAL VS EN ANTINODE EXTREM																									
CODI ASSAIG	P 01	P 02	P 03	P 04	P 05	P 06	P 07	P 08	P 09	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15	P 16	P 17	P 18	P 19	P 20	P 21	P 22	P 23	P 24	MITJA ACOTADA
DXSUPBBAC	501,8	477,4	465,2	487,6	521,1	474,7	522,7	495,9	-	851,2	471,9	502,3	490,0	476,5	504,0	484,8	521,8	502,0	485,1	499,9	490,7	-	487,5	-	492,8
DXSUPBAAE	502,6	480,1	469,5	485,3	528,9	473,3	522,5	495,7	-	449,7	466,3	504,0	488,7	482,5	505,3	487,9	534,9	500,3	449,8	514,8	488,9	-	485,1	-	487,2
DIFERÈNCIA	-0,8	-2,7	-4,4	2,3	-7,8	1,3	240,2	0,2	-	401,5	5,6	-1,7	1,3	14,0	-1,3	-3,1	-13,1	1,7	35,3	-14,9	1,9	-	2,4	-	0,4
DXINFBBAC	501,6	480,1	468,4	486,8	519,5	477,2	520,0	496,3	-	547,3	468,7	502,8	490,6	460,7	503,3	485,2	524,6	502,8	481,0	521,6	491,1	-	482,7	-	493,2
DXINFBAAE	502,4	484,0	467,1	486,5	527,8	472,8	522,7	496,6	-	451,0	471,5	504,2	491,4	475,6	505,4	487,3	530,6	501,5	456,3	513,2	488,8	-	486,4	-	490,1
DIFERÈNCIA	-0,8	-3,9	1,3	0,3	-8,2	-4,4	-2,8	-0,3	-	96,3	-2,8	-1,4	-0,8	-14,9	-2,1	-2,0	-6,0	1,3	24,8	8,4	2,3	-	-3,8	-	-1,0

El ensayo más consistente en la dirección X(DX) en piezas normalizadas es usar la bola A y golpear en el antinodo extremo. Se ha comprobado que no hay diferencias apreciables en los resultados obtenidos en los diferentes antinodos y pelotas usadas. De todas formas, tal y como se demuestra en las tablas adjuntas, prescindir de las lecturas de frecuencias que corresponden a modos distintos del fundamental, los ensayos que presentan mayor consistencia y menor dispersión de lecturas son los realizados con la bola A en el antinodo extremo.

CODI ASSAIG	TIPUS DE VIDRE	RANG MITJÀ	DESVIACIÓ TÍPICA MITJANA	CODI ASSAIG	TIPUS DE VIDRE	RANG MITJÀ	DESVIACIÓ TÍPICA MITJANA
DXSUPBBAC	MURANO	14,15	4,68	DXSUPBAAE	MURANO	10,95	3,82
DXSUPBBAC	FLOAT	14,80	4,33	DXSUPBAAE	FLOAT	5,35	1,47
DXINFBBAC	MURANO	32,22	13,83	DXINFBAAE	MURANO	9,36	3,16
DXINFBBAC	FLOAT	17,55	6,10	DXINFBAAE	FLOAT	22,45	6,47
MITJANA TOTAL		19,68	7,23	MITJANA TOTAL		12,03	3,73

Ensayos en la dirección Y (DY)

El uso de la bola B no es adecuado para el análisis en la dirección Y ya que la energía transmitida al sistema no es suficiente para excitar el modo 2 de vibración que corresponde con la dirección Y.

Aparentemente, luce que en la dirección Y tanto el vidrio FLOAT, como el vidrio de Murano tienen módulos de Young más elevados. Como se explicará y demostrará experimentalmente más adelante, esto totalmente erróneo. Esta manera de realizar el ensayo no es correcta ya que no se obtiene el modo 1 de vibración de la pieza.

5. Resultados de los ensayos en Cara Superior vs. Cara Inferior

En esta sección se analiza si la cara de impacto tiene influencia en la frecuencia fundamental registrada. Se comparan las frecuencias registradas para ensayos sobre condiciones similares (misma pieza y misma bola), pero realizados en la cara superior e inferior respectivamente.

Resultados de los ensayos en Cara Superior vs. Cara inferior en piezas normalizadas de vidrio de Murano.

Ensayos en Dirección X

CODI ASSAIG	DXSUPBAAE	DXINFBAAE			CODI ASSAIG	DXSUPBBAC	DXINFBBAC		
CODI PIASTRA	FRECUENCIA (Hz)	FRECUENCIA (Hz)	RANG	%	CODI PIASTRA	FRECUENCIA (Hz)	FRECUENCIA (Hz)	RANG	%
1	502,55	502,40	0,15	0,03%	1	501,80	501,60	0,20	0,04%
2	480,10	484,03	3,92	0,81%	2	477,43	480,13	2,70	0,56%
3	469,53	467,05	2,48	0,53%	3	465,15	468,38	3,23	0,69%
4	485,30	486,53	1,23	0,25%	4	487,58	486,78	0,80	0,16%
5	528,85	527,78	1,07	0,20%	5	521,10	519,53	1,57	0,30%
6	473,33	472,83	0,50	0,11%	6	474,65	477,20	2,55	0,54%
7	523,98	522,73	1,25	0,24%	7	522,70	519,95	2,75	0,53%
8	495,65	496,55	0,90	0,18%	8	495,88	496,25	0,38	0,08%
9	-	-	-	-	9	-	-	-	-
10	449,68	450,98	1,30	0,29%	10	851,20	746,40	104,80	13,12%
11	466,30	471,45	5,15	1,10%	11	471,90	468,68	3,22	0,69%
12	503,95	504,15	0,20	0,04%	12	502,28	502,80	0,52	0,10%
13	488,70	491,35	2,65	0,54%	13	489,95	490,55	0,60	0,12%
14	462,48	475,55	13,08	2,79%	14	476,50	460,70	15,80	3,37%
15	505,28	505,38	0,10	0,02%	15	503,95	503,30	0,65	0,13%
16	487,85	487,25	0,60	0,12%	16	484,75	485,23	0,48	0,10%
17	534,88	530,55	4,33	0,81%	17	521,83	524,58	2,75	0,53%
18	500,28	501,53	1,25	0,25%	18	501,95	502,83	0,88	0,17%
19	449,78	456,20	6,43	1,42%	19	485,10	480,98	4,13	0,85%
20	514,75	513,18	1,58	0,31%	20	499,90	521,60	21,70	4,25%
21	488,85	488,75	0,10	0,02%	21	490,70	491,05	0,35	0,07%
22	-	-	-	-	22	-	-	-	-
23	485,08	486,43	1,35	0,28%	23	487,45	482,65	4,80	0,99%
24	-	-	-	-	24	-	-	-	-

Como se puede comprobar en las tablas, la mayor parte de frecuencias registradas son muy similares con diferencias inferiores al 2%.

En las piezas 14 y 20 sí que se han detectado diferencias mayores, pero no se ha podido determinar su origen a partir de su observación. Posiblemente estas diferencias pueden derivar de procesos de enfriamientos poco controlados.

Solo en un caso se encuentra una diferencia significativa (pieza 10 en rojo). Esta en realidad es debida a no haberse leído correctamente la frecuencia fundamental.

Ensayos en Direccion Y

CODI ASSAIGS	DYSUPBAAC	DXINFBAAC			CODI ASSAIGS	DYSUPBBAC	DYINFBBAC		
CODI PIASTRA	FRECUENCIA (Hz)	FRECUENCIA (Hz)	RANG	%	CODI PIASTRA	FRECUENCIA (Hz)	FRECUENCIA (Hz)	RANG	%
1	937,78	951,55	13,77	1,46%	1	504,85	501,15	3,70	0,74%
2	923,23	923,58	0,35	0,04%	2	478,10	490,58	12,48	2,58%
3	933,90	933,73	0,18	0,02%	3	464,40	469,35	4,95	1,06%
4	955,00	961,20	6,20	0,65%	4	489,80	492,85	3,05	0,62%
5	510,75	511,85	1,10	0,22%	5	514,85	515,38	0,53	0,10%
6	908,70	907,45	1,25	0,14%	6	484,05	589,50	105,45	19,65%
7	992,20	996,38	4,17	0,42%	7	528,90	525,45	3,45	0,65%
8	939,85	943,55	3,70	0,39%	8	497,85	498,38	0,52	0,11%
9	-	-	-	-	9	-	-	-	-
10	875,80	867,50	8,30	0,95%	10	875,30	876,13	0,82	0,09%
11	480,30	470,40	9,90	2,08%	11	474,53	441,63	32,90	7,18%
12	932,88	919,45	13,43	1,45%	12	501,48	715,35	213,88	35,15%
13	915,65	919,13	3,48	0,38%	13	700,63	705,30	4,67	0,67%
14	875,15	875,08	0,08	0,01%	14	489,90	488,80	1,10	0,22%
15	931,55	940,15	8,60	0,92%	15	504,05	508,58	4,52	0,89%
16	910,38	895,35	15,03	1,66%	16	486,28	485,38	0,90	0,19%
17	958,18	960,23	2,05	0,21%	17	517,58	523,63	6,05	1,16%
18	921,15	921,68	0,52	0,06%	18	503,15	504,10	0,95	0,19%
19	903,83	895,25	8,58	0,95%	19	489,58	483,23	6,35	1,31%
20	964,68	529,13	435,55	58,31%	20	521,98	516,13	5,85	1,13%
21	960,88	961,68	0,80	0,08%	21	948,33	725,30	223,03	26,65%
22	-	-	-	-	22	-	-	-	-
23	922,43	920,05	2,37	0,26%	23	600,03	603,28	3,25	0,54%
24	-	-	-	-	24	-	-	-	-

Como en la dirección X, la mayor parte de las frecuencias registradas son muy similares con diferencias inferiores al 2%.

Detectamos más casos de diferencia de modos de frecuencia registrados en una cara y en otra (en rojo). Con todo y que son mínimos, se recomienda realizar 11 golpes (número impar) y priorizar las frecuencias próximas a las esperadas.

En alguna de las piezas (en naranja) se observan variaciones de más del 2% que pueden apuntar a diferencias de velocidad de enfriamiento entre caras.

Resultados del ensayo en Cara Superior vs. Cara Inferior en piezas d vidrio FLOAT

Ensayos en Dirección X

ASSAIGS EN DIRECCIO X:

CODI ASSAIGS	DXSUPBAAE	DXINFBAAE			CODI ASSAIGS	DXSUPBBAC	DXINFBBAC		
CODI PIASTRA	FRECUENCIA (Hz)	FRECUENCIA (Hz)	RANG	%	CODI PIASTRA	FRECUENCIA (Hz)	FRECUENCIA (Hz)	RANG	%
1	507,64	501,62	6,02	1,19%	1	504,94	499,88	5,06	1,01%
2	502,22	494,06	8,16	1,64%	2	485,10	484,96	0,14	0,03%

ASSAIGS EN DIRECCIO Y:

CODI ASSAIGS	DYSUPBAAE	DXINFBAAE		
CODI PIASTRA	FRECUENCIA (Hz)	FRECUENCIA (Hz)	RANG	%
1	1020,00	1011,00	9,00	0,89%
2	1001,00	996,02	4,98	0,50%

En el caso de los vidrios Float, las frecuencias registradas en ambas caras son ***muy similares, con diferencias inferiores al 2% en las dos direcciones.***

Sobre los ensayos realizados en Cara Superior vs. los realizados en Cara Inferior

- En general, tanto las piezas de vidrio Float como las de vidrio de Murano, no presentan diferencias elásticas significativas entre las caras superior e inferior. Descontando los errores en la lectura de la frecuencia fundamental de vibración, en un 92.4% de los ensayos realizados la diferencia de frecuencia fundamental de vibración registrada entre las caras superior e inferior ha sido inferior al 2%.
- Teniendo en cuenta que los ensayos realizados con la bola A son más precisos, ya que tienen una menor dispersión, el 9.5% de las piezas de Murano analizadas (2 sobre 21) han presentado diferencias de frecuencias fundamentales de vibración entre caras superiores al 2%, pero superando el 3%.
- Dado que las diferencias son pequeñas y aisladas, no se considera necesario establecer ensayos para ambas caras en el protocolo.

6. Resultados de los ensayos en Dirección X vs. Dirección Y

En este capítulo se demuestra que la formulación aplicada para la obtención del modulo de Young es operativa para barras rectangulares siempre y cuando se use el modo 1 de vibración de las piezas. En el caso de barras cortas (más anchas que largas), se demostrara experimentalmente que no es posible determinar correctamente el MOE a partir de la frecuencia en modo 2 (DY) e intercambiar las magnitudes de ancho y longitud.

Los ensayos realizados en piezas normalizadas de vidrio tipo Float

Se han realizado dos series de ensayos. La primera sobre 2 piezas normalizadas de vidrio float de 326mm x 240mm x 10mm:

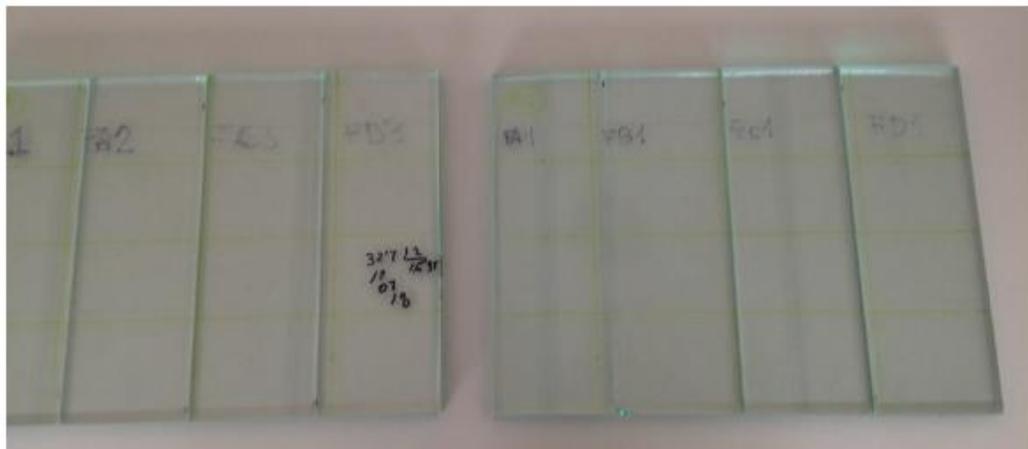
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección X por la cara superior con la bola A en el antinodo extremo.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección X por la cara inferior con la bola A en el antinodo extremo.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección Y por la cara superior con la bola A en el antinodo extremo.
- 11 percusiones en 2 piezas normalizadas en la dirección Y por la cara inferior con la bola A en el antinodo extremo.

Posteriormente, cada pieza se ha cortado en 4 partes iguales en sentido transversal, obteniendo 8 piezas de unos 240mm x 80mm x 10mm en que la dirección X (DX) se corresponde con la dirección Y (DY) de la pieza original de donde provienen:

- 11 percusiones en 4 piezas normalizadas en la dirección X por la cara superior con la bola A en el antinodo extremo.
- 11 percusiones en 4 piezas normalizadas en la dirección X por la cara inferior con la bola A en el antinodo extremo.

En total se han realizado 176 percusiones en probetas de vidrio Float.

En total s'han realitzat 176 percussions en provetes de vidre FLOAT.



Los ensayos realizados en piezas normalizadas de vidrio de Murano

Se han realizado dos series de ensayos. La primera sobre 24 piezas normalizadas de vidrio de Murano de 326mm x 240mm x 10mm:

- 11 percusiones en 21 piezas normalizadas en la dirección X por la cara superior con la bola B en el antinodo central.
- 11 percusiones en 21 piezas normalizadas en la dirección Y por la cara superior con la bola A en el antinodo central.

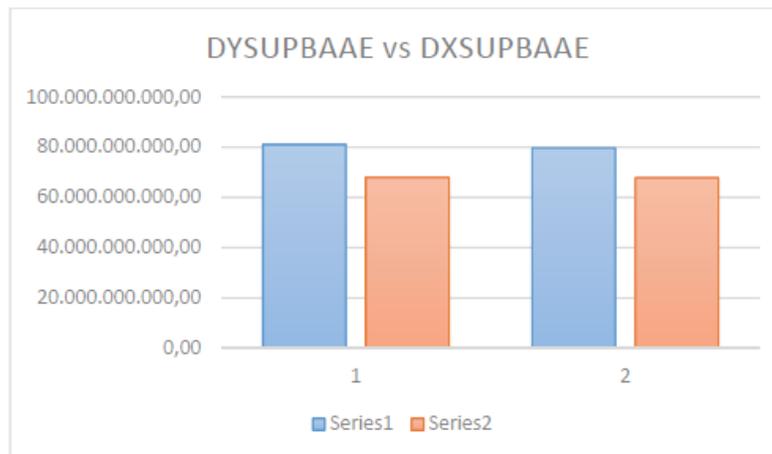
Posteriormente, las 5 primeras piezas se han cortado en 4 partes iguales en sentido transversal, obteniendo 20 piezas de unos 240mm x 80mm x 10mm en los que la dirección X (DX) se corresponde con la dirección Y (DY) de la pieza original de donde provienen:

- 11 percusiones en 20 piezas normalizadas en la dirección X por la cara superior con la bola A en el antinodo extremo.
- 11 percusiones en 20 piezas normalizadas en la dirección X por la cara superior con la bola A en el antinodo extremo.

En total se han realizado 902 percusiones en probetas de vidrio de Murano.

Resultados de los ensayos en dirección DX vs. dirección DY en piezas normalizadas de vidrio Float

Resultats dels assaigs en direcció DX vs. Direcció DY en piastres normal



CODI ASSAIGS	DYSUPBAAE	DXSUPBAAE		
CODI PIASTRA	MOE (Pa)	MOE (Pa)	RANG	%
1	81.006.991.781,96	67.952.445.901,88	13.054.545.880,08	119,21%
2	79.603.568.899,77	67.861.530.917,00	11.742.037.982,77	117,30%

CODI ASSAIGS	DYINFBAAE	DXINFBAAE		
CODI PIASTRA	MOE (Pa)	MOE (Pa)	RANG	%
1	79.583.763.405,58	66.350.333.526,64	13.233.429.878,95	119,94%
2	78.813.479.670,88	65.674.236.641,85	13.139.243.029,03	120,01%

Como se puede apreciar en las graficas y tablas adjuntas, aparentemente el vidrio Float tiene un MOE de alrededor de un 20% superior en la dirección Y que en la dirección X.

Teniendo en cuenta que el vidrio en general es un material isótropo y que el proceso de fabricación del vidrio float no habrá de aportar anisotropías, ya es posible intuir que los resultados obtenidos en los ensayos en DY intercambiando longitud y ancho y usando el modo 2 no son correctas.

Para comprobarlo experimentalmente, se cortaran las piezas en 4 partes iguales de forma que su directriz longitudinal se corresponda con la transversal de la pieza original y se ensayaran.

Resultados de los ensayos en las piezas en sentido DY de vidrio Float

CODI ASSAIG	DX SUP - BA AE	DY SUP - BA AE	DX SUP - BA AE
CODI PIASTRA	MOE PEÇA (Pa)	MOE PIASTRA DY (Pa)	MOE PIASTRA DX (Pa)
1A	70.448.849.771	81.006.991.782	67.952.445.902
1B	71.357.686.085	81.006.991.782	67.952.445.902
1C	70.541.624.050	81.006.991.782	67.952.445.902
1D	69.413.391.615	81.006.991.782	67.952.445.902
MITJANA	70.440.387.880	81.006.991.782	67.952.445.902
RANG	1.944.294.470		
DISPERSIÓ	1.5%		
2A	71.180.151.403	79.603.568.900	67.861.530.917
2B	70.318.725.952	79.603.568.900	67.861.530.917
2C	72.609.091.112	79.603.568.900	67.861.530.917
2D	66.964.881.000	79.603.568.900	67.861.530.917
MITJANA	70.268.212.367	79.603.568.900	67.861.530.917
RANG	5.644.210.112		
DISPERSIÓ	4.7%		

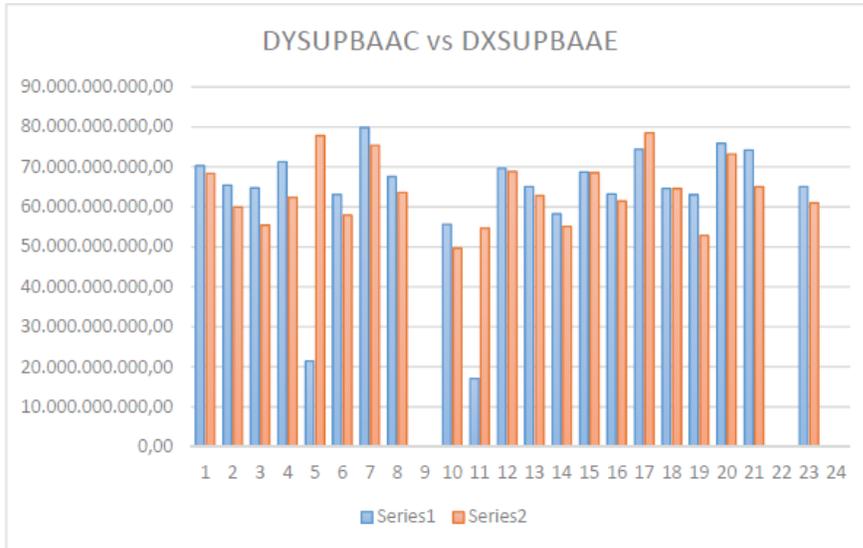
Como se puede comprobar en las tablas y graficas adjuntas, el MOE medo de las piezas transversales es muy similar al MOE en la dirección X de las piezas originales, **confirmando la isotropía del material.**

Las diferencias de MOEs en la dirección X y Y son pequeñas, del orden de un 3.5%.

La dispersión de los resultados de MOE obtenidos a partir de los 4 laminas que forman una pieza a llegado hasta un 4.7% en la segunda pieza respecto a la media.

Resultados de los ensayos en dirección DX vs. dirección Dy en piezas normalizadas de vidrio de Murano

Aplicaciones del Vidrio Opalino para Revestimiento de Paramentos



CODI ASSAIGS	DYSUPBAAC	DXSUPBAAE		
CODI PIASTRA	MOE (Pa)	MOE (Pa)	RANG	%
1	70.329.428.147,92	68.402.126.060,98	1.927.302.086,94	102,82%
2	65.465.095.081,10	59.955.546.197,87	5.509.548.883,23	109,19%
3	64.792.598.704,37	55.464.276.497,83	9.328.322.206,55	116,82%
4	71.270.701.828,55	62.329.857.822,83	8.940.844.005,72	114,34%
5	21.433.881.100,68	77.825.217.899,61	-56.391.336.798,93	27,54%
6	63.086.180.420,42	57.967.333.864,80	5.118.846.555,63	108,83%
7	79.888.597.701,81	75.453.388.236,77	4.435.209.465,04	105,88%
8	67.593.043.925,93	63.665.828.544,84	3.927.215.381,10	106,17%
9	-	-	-	-
10	55.642.674.015,92	49.678.315.230,58	5.964.358.785,35	112,01%
11	17.109.498.462,92	54.615.284.214,24	-37.505.785.751,32	31,33%
12	69.702.371.262,37	68.888.512.009,57	813.859.252,80	101,18%
13	65.109.974.907,16	62.812.266.964,41	2.297.707.942,75	103,66%
14	58.265.052.117,47	55.104.990.068,12	3.160.062.049,35	105,73%
15	68.764.725.255,64	68.514.146.914,03	250.578.341,60	100,37%
16	63.251.678.331,64	61.514.186.878,85	1.737.491.452,79	102,82%
17	74.428.847.485,03	78.546.616.800,48	-4.117.769.315,45	94,76%
18	64.654.468.212,79	64.584.260.867,17	70.207.345,62	100,11%
19	63.008.023.886,59	52.843.192.223,20	10.164.831.663,39	119,24%
20	75.933.193.164,19	73.220.651.324,93	2.712.541.839,26	103,70%
21	74.211.726.759,75	65.052.089.235,82	9.159.637.523,93	114,08%
22	-	-	-	-
23	65.144.443.232,47	61.010.459.076,29	4.133.984.156,18	106,78%
24	-	-	-	-

Errores de lectura de frecuencia de resonancia fundamental en piezas 5 y 11 en ensayos en DY.

Como en el caso del vidrio Float, en general, el MOE en dirección Y obtenido a partir del modo 2 de vibración e intercambio de las magnitudes de longitud y anchura, es mayor que el MOE en dirección X. Concretamente, el MOE en dirección Y es entre un 0,37% y un 19.24% superior al obtenido por la dirección X presentando una gran variabilidad probablemente debido a defectos de las piezas.

La pieza 17 es la excepción

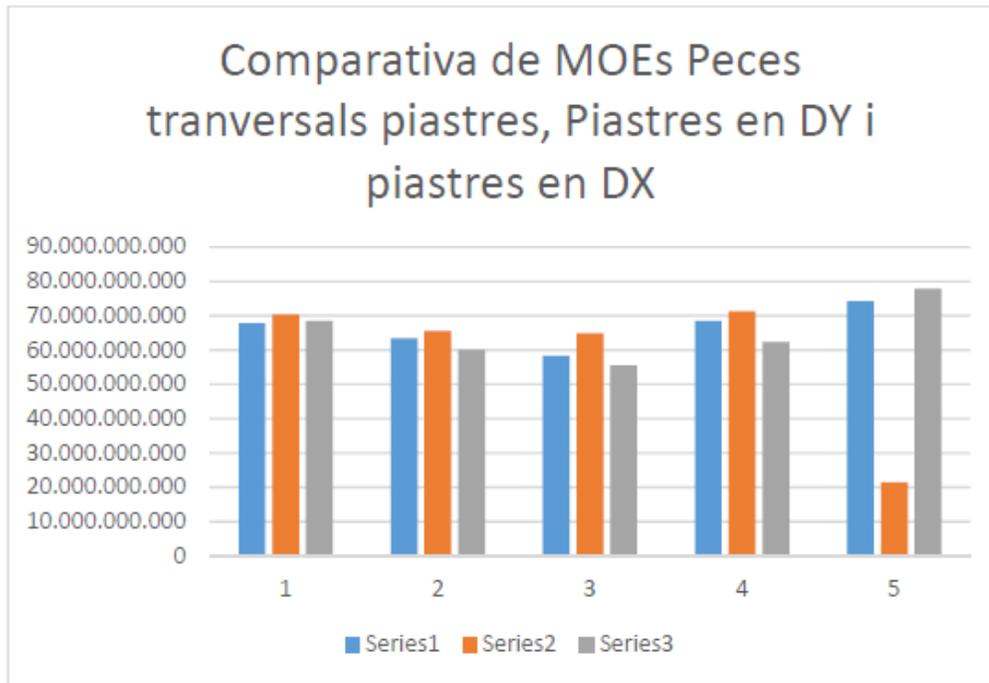
Sabemos que como norma general el vidrio es un material isótropo, se puede intuir que los resultados obtenidos en los ensayos en DY intercambiando longitud y anchura y usando el modo 2 no son correctos.

Igualmente, para comprobarlo, se cortaran 5 piezas en 4 partes iguales de forma que su directriz original se corresponda con la transversal de la pieza original y se ensayaran.

Resultados de los ensayos en piezas en sentido DY de vidrio de Murano

CODI PIASTRA	1	2	3	4	5
CODI PEÇA	MOE PEÇA (Pa)				
A	62.223.938.073	68.014.496.086	53.959.934.603	64.548.546.238	75.533.542.084
B	74.862.565.888	63.198.988.831	58.279.594.089	74.353.397.310	77.795.179.324
C	68.157.146.339	63.719.984.884	59.391.605.846	73.099.475.668	76.191.324.894
D	65.700.653.626	58.378.225.357	61.531.426.334	61.646.122.778	67.389.067.795
MITJANA	67.736.075.981	63.327.923.790	58.290.640.218	68.411.885.498	74.227.278.524
MAX	74.862.565.888	68.014.496.086	61.531.426.334	74.353.397.310	77.795.179.324
MIN	62.223.938.073	58.378.225.357	53.959.934.603	61.646.122.778	67.389.067.795
RANG	12.638.627.815	9.636.270.729	7.571.491.732	12.707.274.532	10.406.111.529
DISPERSIÓ	10,5%	7,8%	7,4%	9,9%	9,2%

En la tabla anterior, podemos ver como piezas de vidrio que provienen de una misma pieza pueden dar lugar a MOEs diferentes, llegando a una dispersión de hasta el 10,5% respecto a la media debido a las imperfecciones locales de cada pieza.



CODI ASSAIG	CODI PIASTRA	1	2	3	4	5
DX SUP - BA AE	MOE MITJA DX PECES	67.736.075.981	63.327.923.790	58.290.640.218	68.411.885.498	74.227.278.524
DX SUP - BA AE	MOE DX PIASTRA	68.402.126.061	59.955.546.198	55.464.276.498	62.329.857.823	77.825.217.900
	DIF % RESPECTE MOE DX PIASTRA	-1%	6%	5%	10%	-5%

CODI ASSAIG	CODI PIASTRA	1	2	3	4	5
DY SUP - BA AC	MOE DY PIASTRA	70.329.428.148	65.465.095.081	64.792.598.704	71.270.701.829	21.433.881.101
DX SUP - BA AE	MOE DX PIASTRA	68.402.126.061	59.955.546.198	55.464.276.498	62.329.857.823	77.825.217.900
	DIF % RESPECTE MOE DX PIASTRA	3%	9%	17%	14%	-72%

Como se puede comprobar en la grafica y tablas anteriores, los MOEs de las piezas transversales son más próximas al MOE de la pieza encontrada en la dirección X y no siempre son superiores a esta. Las diferencias tienen que ver con las imperfecciones de las piezas.

En la pieza 5 en el ensayo DY SUP-BA AC se ha producido un error de lectura de la frecuencia.

Sobre los resultados en DX vs. DY

Tanto el vidrio Float como el vidrio de Murano son materiales isótropos. Piezas provenientes del mismo vidrio pueden tener módulos de Young ligeramente diferentes debido a defectos locales del vidrio.

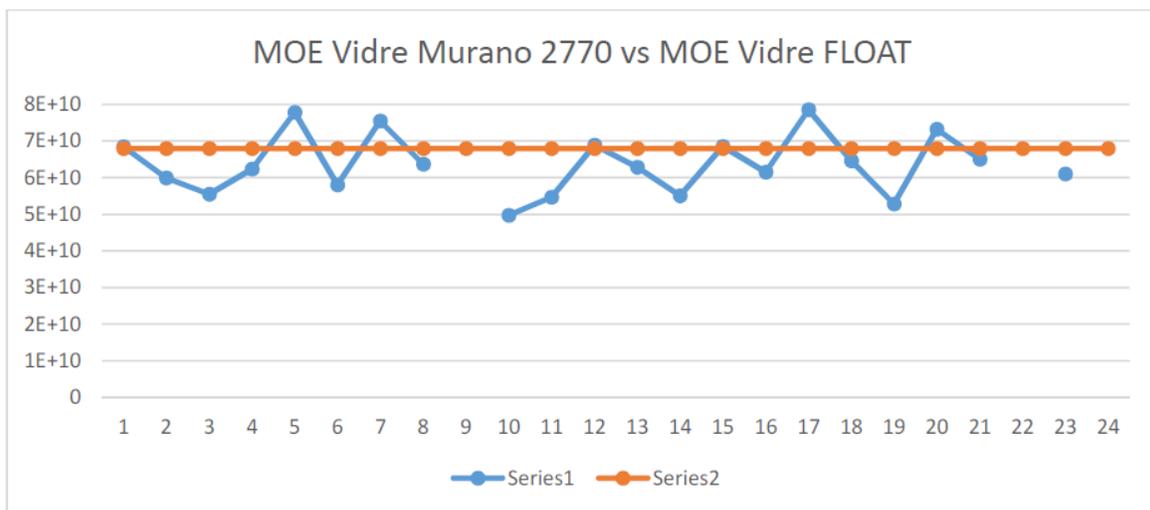
En el caso del vidrio Float, la dispersión del MOE de una pieza respecto a la media del conjunto de piezas que forman una misma pieza puede alcanzar el 4%.

En el caso del vidrio de Murano, la dispersión del MOE de una pieza respecto a la media del conjunto de piezas que forman una misma pieza puede alcanzar al 10% debido a que las piezas tienen mayores imperfecciones.

La relación entre el modo 2 y el modo 1 de vibración de las piezas es de 2.

7. Caracterización elástica del material

Caracterización elástica del vidrio de Murano 2770



CODI PIASTRA	MOE DX (Pa)	% DESV.	NIVELL MOE
1	68.402.126.060,98	7,40%	4
2	59.955.546.197,87	-5,86%	2
3	55.464.276.497,83	-12,91%	2
4	62.329.857.822,83	-2,13%	3
5	77.825.217.899,61	22,20%	5
6	57.967.333.864,80	-8,98%	2
7	75.453.388.236,77	18,47%	5
8	63.665.828.544,84	-0,03%	3
9	-	-	-
10	49.678.315.230,58	-22,00%	1
11	54.615.284.214,24	-14,25%	1
12	68.888.512.009,57	8,17%	4
13	62.812.266.964,41	-1,38%	3
14	55.104.990.068,12	-13,48%	1
15	68.514.146.914,03	7,58%	4
16	61.514.186.878,85	-3,41%	3
17	78.546.616.800,48	23,33%	5
18	64.584.260.867,17	1,41%	3
19	52.843.192.223,20	-17,03%	1
20	73.220.651.324,93	14,97%	5
21	65.052.089.235,82	2,14%	3
22	-	-	-
23	61.010.459.076,29	-4,20%	2
24	-	-	-
MITJA ARITMETICA	63.688.026.044,44	0,0%	4 19% N1
MAX	78.546.616.800,48	23,33%	4 19% N2
MIN	49.678.315.230,58	-22,00%	6 29% N3
RANG	28.868.301.569,90	45,33%	3 14% N4
RANG/5	5773660314	9,07%	4 19% N5

Tal y como se puede apreciar en la grafica anterior, el modulo de Young medio de los vidrios transparentes tipo float ensayados es de 67.9 GPa.

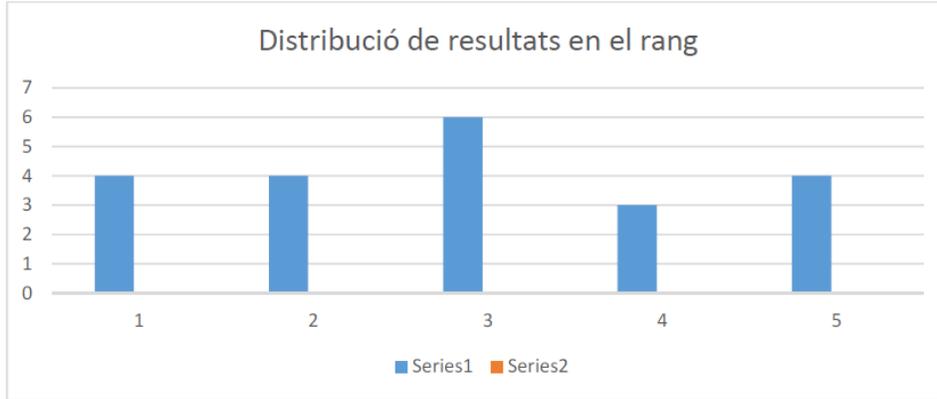
El modulo de Young medio del vidrio de Murano de color 2770 es de 63.68Gpa.

Las diversas piezas presentan una dispersión respecto a la media de hasta un 23.33%.

El MOE más alto registrado es de 78.54GPa y el más bajo de 49.68 GPa de diferencia, representando un 45,33% respecto a la media.

Distribución de la población de MOEs de las piezas de vidrio de Murano de color 2770

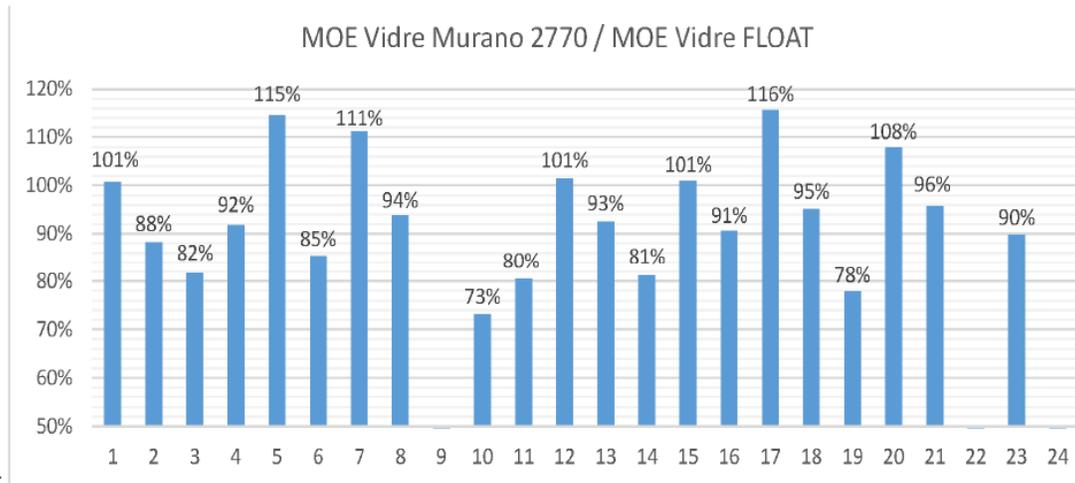
Distribución de la población de MOEs de las piezas de vidrio de Murano de color 2770



Se ha dividido el rango de valores en que varían los módulos de Young encontrados en 5 partes iguales y a continuación se han contado cuantas piezas hay en cada parte. Como se puede comprobar en la grafica inferior, se intuye una distribución de resultados en campana e Gauss muy amplia en la base y un ligero pico concentrado en la zona central.

Así, parece que los diversos módulos de Young (MOE) de las piezas de vidrio de murano de color 2770 analizadas se distribuyen muy uniformemente en el siguiente rango.

Comparativa vidrio de Murano color 2770 vs. vidrio tipus FLOAT



Asumiendo que un modulo de Young alto denota un mejor proceso de conformación de los vidrios y considerando que los 67.9GPa del vidrio tipo Float es un valor optimo podemos clasificar las diversas piezas a partir del vidrio Float. A partir de las 21 piezas analizadas se puede apreciar que un 33% tienen un modulo de Young igual a superior al de vidrio tipo Float.

Con todo y que un MOE alto denota un buen proceso de producción, cabe estudiar si una vez colocados en el lecho de mortero para alicatados, es más convenientes que el vidrio tenga un modulo de Young alto o bajo para contribuir a evitar posibles tensiones de rotura.

8. Aproximación al MOE del material de las piezas irregulares

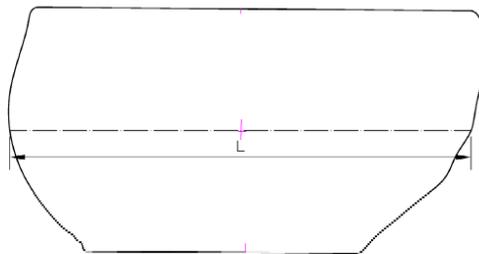
En este capítulo se describe el protocolo creado para el ensayo de las piezas en bruto. Dado que la geometría de los extremos de las piezas es regular y que el ensayo y formulación usados es para barras prismáticas, lo fundamental será establecer cuál es nuestro % de error máximo al aplicarlo a piezas irregulares. De esta manera, se determinara si el protocolo de ensayo es apropiado para determinar el modulo de Young de las piezas.

Debido a que en una primera campaña de ensayos de piezas en bruto (piezas 1 a 24) se obtuvo por error el modo 2 de vibración, se ha realizado una segunda campaña de 15 piezas (piezas 25 a 39) para rectificar las mediciones.

El protocolo de ensayo en piezas irregulares

A continuación se expone el protocolo desarrollado para la asignación de piezas de vidrio de Murano en bruto:

- Pesado de la pieza para determinar su masa
- Medida de la longitud de la pieza sobre el eje longitudinal tal y como se indica en la figura inferior.



- Colocar la pieza sobre una superficie elástica continua
- Realizar 11 percusiones con una pelota de golf y hallar la frecuencia fundamental con un programa que calcule la transformada rápida de Fourier como hace el FFT Analyzer de www.fakopp.com para calcular la frecuencia fundamental a partir de la media de los valores orientativos.
- Ingresar los datos en una hoja de cálculo con las formulas para obtener el MOE de la pieza
- Comparar el MOE obtenido con el límite establecido para determinar si la pieza es apta o no.

Evaluación de resultados obtenidos

Avaluació de resultats obtinguts

CODI PIASTRA	FRECUENCIA PIASTRA NORMALIZADA (Hz)	MOE PIASTRA NORMALIZADA (Pa)	FRECUENCIA PIASTRA EN BRUT (Hz)	MOE APROXIMAT PIASTRA EN BRUT (Pa)	% ERROR	RELACIO MOE PN/MOE PB	MOE PIASTRA EN BRUT CORREGIT	% ERROR
25	518,20	73.356.314.566,46	311,64	87.241.742.502,11	18,93%	0,841	73.779.170.645,699	0,58%
26	455,25	54.194.503.429,09	262,22	74.586.080.522,78	37,63%	0,727	63.076.447.178,377	16,39%
27	481,65	61.523.378.546,64	269,80	76.962.044.097,37	25,09%	0,799	65.085.767.682,417	5,79%
28	511,20	67.256.204.429,36	281,18	76.358.901.163,77	13,53%	0,881	64.575.697.799,063	-3,99%
29	460,90	54.146.197.848,63	231,78	71.727.891.034,33	32,47%	0,755	60.659.314.691,587	12,03%
30	502,63	65.817.624.906,49	363,72	72.556.305.005,92	10,24%	0,907	61.359.893.268,113	-6,77%
31	490,65	65.267.253.369,25	318,58	75.882.588.571,02	16,26%	0,860	64.172.886.632,602	-1,68%
32	451,65	45.432.210.036,15	324,84	45.072.562.678,71	-0,79%	1,008	38.117.261.278,123	-16,10%
33	462,68	57.036.210.052,18	269,90	65.066.900.516,30	14,08%	0,877	55.026.204.416,570	-3,52%
34	499,20	66.122.807.071,20	311,50	84.417.077.297,78	27,67%	0,783	71.390.389.196,019	7,97%
35	489,93	63.985.538.814,71	255,10	79.960.151.019,71	24,97%	0,800	67.621.226.465,034	5,68%
36	499,98	64.541.192.563,29	272,14	77.479.318.128,10	20,05%	0,833	65.523.219.387,180	1,52%
37	494,08	66.987.090.529,32	280,10	74.270.980.002,83	10,87%	0,902	62.809.970.898,047	-6,24%
38	460,28	53.591.685.497,25	253,58	69.384.961.123,52	29,47%	0,772	58.677.930.313,618	9,49%
39	495,75	64.367.293.075,11	274,36	68.463.811.582,73	6,36%	0,940	57.898.926.510,956	-10,05%
FACTOR DE CORRECCIÓ						0,846		

Asumiendo que el MOE encontrado a partir del ensayo de la pieza normalizada es el más ajustado, podemos comparar cual es el % de error que tenemos al realizar el ensayo de piezas en bruto. Así entonces, en la tabla superior se puede comprobar que al realizar los ensayos siguiendo el protocolo se llega a tener errores de hasta el 37.63%.

A fin de afinar los resultados y teniendo en cuenta que la geometría de las piezas sigue unos ciertos patrones, se ha encontrado un factor de corrección. Así entonces, al aplicar el factor de corrección al MOE aproximado de la pieza en bruto y encontrar el MOE de la pieza en bruto corregida los errores se reducen hasta en un 16.4%.

Sobre el protocolo de ensayo

Con todo y que el nivel de precisión es bajo debido a la influencia de la geometría y las imperfecciones locales del material, parece suficiente para tener en cuenta una valoración cualitativa del MOE del material comparada con el vidrio Float o permitir establecer un limite a superar.

Debido a la geometría irregular en el sentido longitudinal de la pieza, es difícil encontrar la frecuencia fundamental de la pieza en bruto que a menudo queda “enmascarada” por el modo 2 y hay que localizarla “manualmente”. Se hará necesario mejorar el sistema de detección.

9. Conclusiones

Sobre el material y las piezas

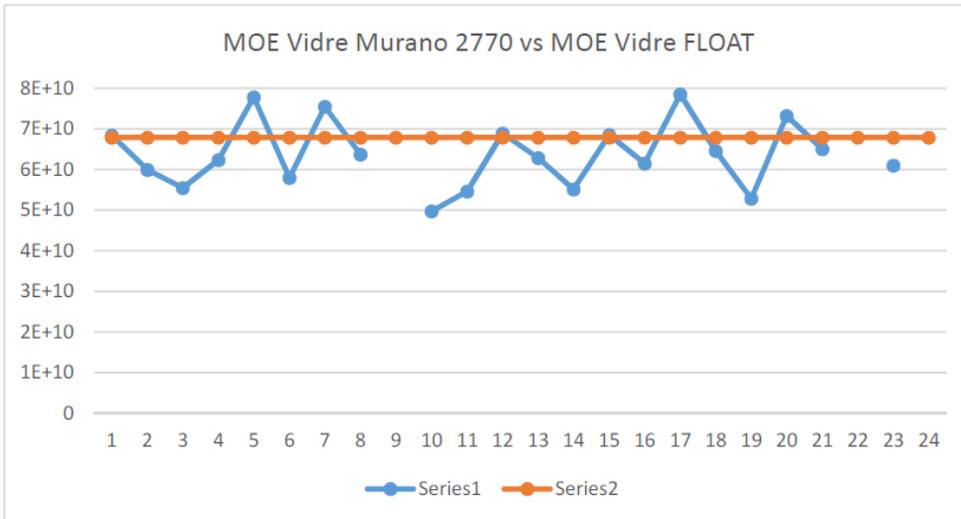
- Las piezas son muy diferentes a nivel de masa y superficie: se ha comprobado que,
- La densidad del material que compone las piezas de vidrio de color 2770 puede variar hasta un 16.16% según piezas respecto a la densidad media de las piezas de este color. De las 24 piezas de vidrio de Murano color 2770 se ha determinado que la densidad media del material es de $2,3351 \text{ g/cm}^3$. El valor máximo registrado es de $2,579 \text{ g/cm}^3$ y el mínimo de $1,957 \text{ g/cm}^3$. Debido a que las diferencias son significativas **se habrá que incluir el peso de las piezas en el protocolo de ensayo.**
- **No existen diferencias significativas entre el comportamiento elástico y el modulo de Young del material midiendo las dos caras de cada pieza.** Se han analizado las piezas desde la cara superior y desde la cara inferior. Solo en un 1% de los casos la diferencia de lectura entre ambas caras ha sido superior al 2%. En estos casos, la diferencia ha estado provocada por las distorsiones en la frecuencia media debido a no siempre haber leído el modo 1.
- Tanto el vidrio de Murano como el vidrio Float son materiales isótropos. Tal y como se explica anteriormente, para comprobar la isotropía de los materiales se han cortado 2 piezas de vidrio Float y 5 de vidrio de murano en 4 partes en sentido transversal y se han ensayado para compararlos con los resultados obtenidos en la medición en el sentido longitudinal de la pieza original.

En el caso del vidrio Float se ha obtenido un MOE medio de las piezas (dirección Y) de un 3.5% mayor que lo obtenido en la dirección X. Se trata de una diferencia pequeña y más teniendo en cuenta que la dispersión de los módulos de Young de las laminas provenientes de una misma pieza han presentado dispersiones de hasta el 4.5% respecto a la media de aquellas.

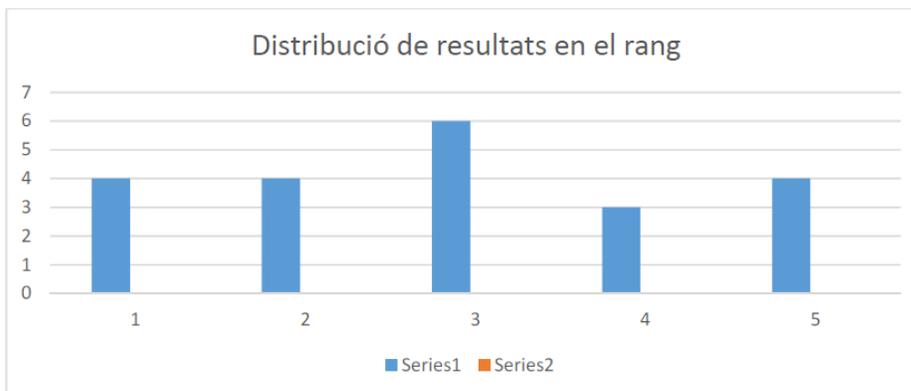
En el caso del vidrio de Murano, se ha obtenido un MOE medio de las piezas (dirección Y) que varía entre el -5% y +10% respecto a lo obtenido en la dirección X. Se trata de una diferencia pequeña y más teniendo en cuenta que la dispersión de los módulos de Young de las piezas provenientes de una misma pieza han presentado dispersiones de hasta el 10% respecto a la media de aquellas debido a los defectos de cada pieza.

- **El modulo de Young (MOE) de las piezas de vidrio transparente tipo Float es de unos 67.9 GPa.** Considerando que la aproximación experimental más ajustada es aquella en que el conjunto de lecturas de la frecuencia de resonancia fundamental tiene una dispersión más pequeña, se han como valores más ajustados los del ensayo DXSUPBAAE (Ensayo en dirección X por la cara superior con bola A en el antinodo extremo). A partir de la bibliografía consultada el MOE de un vidrio estándar es de 70GPa. No se ha dispuesto de un número suficiente de piezas de vidrio tipo Float para determinar el grado de dispersión del modulo elástico.

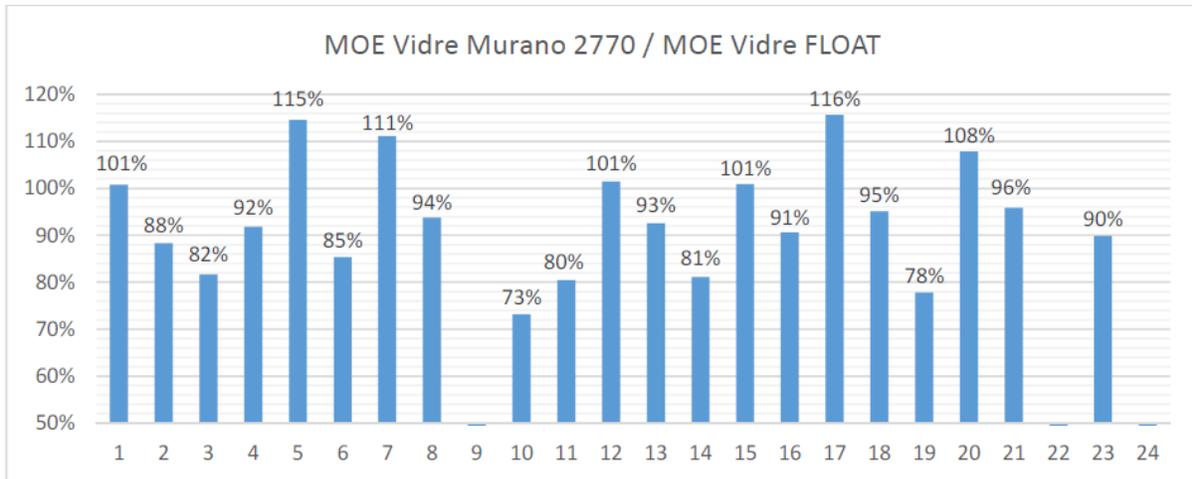
- El módulo de Young (MOE) de las piezas de vidrio de Murano de color 2770 analizadas presenta una dispersión de hasta el 23.23% respecto a la media. Para la determinación del módulo de Young, se ha dispuesto de una medición más fiable el DXSUPBAAE (Medición en dirección X por la cara superior con bola A en el antinodo extremo) ya que es el que daba una dispersión de lecturas de frecuencia de resonancia fundamental más baja. De las 24 piezas normalizadas analizadas se ha determinado que el módulo de Young medio del vidrio de Murano de color 2770 es de 63.68 GPa. El más alto registrado es de 78.54 GPa (pieza 7) y el más bajo es de 49.67 GPa (pieza 10).



Los diversos módulos de Young (MOE) de las piezas de vidrio de Murano de color 2770 analizadas se distribuyen muy uniformemente en su rango. Se ha dividido el rango de valores en que varían los módulos de Young encontrados en 5 partes iguales y a continuación se han contado cuantas piezas hay en cada parte. Como se puede comprobar en la grafica inferior, se intuye una distribución de resultados en campana de Gauss muy amplia en la base y un ligero pico concentrado en la zona central.



El 33% de las piezas de vidrio de Murano analizadas tiene un modulo de Young igual o superior al del vidrio tipo Float. El modulo de Young del vidrio puede variar entre 90GPa y 40 GPa según su composición y proceso de fabricación. EL MOE de un vidrio estándar es de unos 70GPa. Asumiendo que un modulo de Young alto denota un mejor proceso de vitrificación y considerando que los 67.9GPa. del vidrio tipo Float es un valor optimo, podemos clasificar diversas piezas a partir de este criterio. De las 21 piezas analizadas se puede apreciar que un 33% tiene un modulo de Young igual o superior al del vidrio tipo Float.



Los diversos defectos de las piezas afectan la frecuencia de resonancia fundamental de la pieza. Tal como se ha podido comprobar al cortar laminas provenientes de una misma pieza y que por tanto tienen un mismo modulo de Young, la frecuencia de resonancia natural se ve afectada, distorsionándose la lectura y afectando el cálculo del modulo de Young. Para las piezas analizadas de vidrio float, los defectos locales han generado dispersiones del MOE de hasta el 4.5%. En el caso de las piezas de Murano, se ha generado de hasta el 10.5%.

Sobre el ensayo de piezas normalizadas

Si se analizan piezas iguales en material, dimensiones i geometría podemos trabajar directamente con las frecuencias, si no habremos de comparar módulos de Young. El ensayo con métodos de excitación vibratoria por impulso para determinar al modulo de Young de las piezas y a partir de este determinar la calidad mecánica, se basa en el de no menos de de las ondas estacionarias y frecuencias de resonancia. Cuando se golpea un objeto, se le transmite una excitación compleja, pero el objeto tiene tendencia a vibrar en sus frecuencias naturales y modos armónicos. Estas dependen de la masa y la rigidez del objeto y esta depende de la geometría y del modulo de Young. Así, conociendo la masa y si la geometría no varia, la frecuencia será suficiente para determinar si el modulo de Young (MOE) es alto, medio o bajo.

En el caso que nos ocupa, debido a que la geometría de cada pieza y la densidad del material que la forma son muy cambiantes, se harán de registrar durante el proceso de ensayo para poder calcular y

comparar el MOE correspondiente. Por tanto, de momento, **se descarta trabajar directamente con frecuencias en mediciones de piezas en bruto (irregulares).**

Se ha determinado que con los instrumentos de medida sensores con los que se ha trabajado se obtienen resultados con errores inferiores al 1.5% en piezas normalizadas. Para determinarlo se ha utilizado un estudio a nivel teórico teniendo en cuenta que las longitudes pueden tener errores de +-1mm, la masa de +-1 g y las frecuencias registradas e +-1 Hz. Se ha calculado parámetro por parámetro su influencia en el modulo de Young y la influencia más desfavorable de aquel.

Se ha determinado que los modos de vibración esperados para las piezas normalizadas (326mm x 240mm x 10mm) son:

MODE	FRECUENCIA (Hz)	DIRECCIO
MODE 01	511,79	X
MODE 02	944,30	Y
MODE 03	1412,54	X
MODE 04	2606,27	Y
MODE 05	2763,67	X
MODE 06	4570,28	X
MODE 07	5099,22	Y
MODE 08	8432,60	Y

Suposant un Mòdul de Young de estàndard de vidre de 70GPa.

Lo más importante para excitar el modo 1 o frecuencia fundamental de vibración es usar un objeto de masa adecuada con un acabado elástico de goma. Contrariamente a lo que indica la UNE-EN ISO 12650-1, se ha determinado que el ensayo funciona mucho mayor si el objeto precursor es de goma y redondeado, como una pelota ya que traspasa energía de forma mucho más controlada. En los ensayos realizados se han usado 2 pelotas: la A de 46g (de golf) y la B de 13g(de goma). La masa y el antinodo usados son importantes para transmitir niveles correctos de energía que exciten el modo que se busca (modo 1).



La disposición de los apoyos no varía sensiblemente las lecturas siempre y cuando estén recubiertas de material flexible. A modo de ejemplo, cuando se realizan los ensayos en piezas sin normalizar en la dirección X disponiendo de apoyos en 3 posiciones diferentes se recogen las frecuencias del modo 2. Comparando la mas desfavorable de estas lecturas con las del ensayo realizado correctamente en la dirección Y, se puede comprobar que el error de frecuencias registradas debido a la mala disposición de los apoyos es inferior al 2.5% en el 91% de las piezas e inferior al 3.4% en el 9% restante.

Es importante que el número de golpes y lecturas de frecuencia sean impares. Se propone fijarlo en 11 percusiones. Debido a que en algunas ocasiones (muy pocas), las lecturas realizadas alcanzan el 50% de golpes en modo 1 y el otro 50% de golpes en modo 2 y se hace difícil determinar la frecuencia fundamental automáticamente. Esta problemática es fácil de resolver trabajando con un número impar de lecturas.

Se puede realizar el ensayo picando en el antinodo central o el extremo. Se ha comprobado que siempre que la masa de golpeo sea la adecuada para excitar el modo 1, es indiferente golpear en el antinodo extremo, se han registrado **diferencias inferiores al 2%**.

El ensayo más adecuado para piezas normalizadas es el realizado en dirección X por la cara superior con la bola A en el antinodo extremo (DXSUPBAAE). Se considera que este es el ensayo que brinda lecturas más ajustadas ya que es el que presenta menor dispersión de los datos recogidos para cada pieza.

El ensayo en la dirección Y no es adecuado ya que se corresponde con el modo 2.

Sobre el protocolo de ensayo de piezas en bruto

Se ha diseñado un protocolo para piezas en bruto lo más sencillo posible. Este está detallado en el capítulo 8 e incluye el pesado, medición y 11 percusiones para obtener la frecuencia fundamental de cada pieza.

El ensayo se muestra lo suficientemente preciso como para obtener una valoración cualitativa comparada del MOE de cada pieza o establecer y discriminar según lo requerido. Como se ha visto anteriormente, el protocolo permite calcular el módulo de Young de una pieza con un 16% de error.

Es difícil encontrar la frecuencia fundamental de la pieza en bruto. Debido a la geometría irregular en el sentido longitudinal de la pieza, es difícil encontrar la frecuencia fundamental de la pieza en bruto ya que a menudo queda "enmascarada" por el modo 2 y hay que localizarlo "Manualmente". Habrá que mejorar el sistema de detección.

Propuestas

Para continuar desarrollando un protocolo de ensayo para las piezas de vidrio de Murano en bruto se proponen dos líneas de actuación:

1. Ampliar el estudio aplicando el protocolo de ensayos a piezas en bruto. Así nos permitiría avanzar en:
La mejor de la lectura de la frecuencia natural en piezas en bruto
Contrastar los resultados con una población de piezas más amplia para conocer mejor los % de error.
Profundizar en el conocimiento del material usando otros colores.
2. Probar a obtener el módulo de Young de las piezas a partir de la medida de la propagación de una onda a través de las piezas. Dado que los ensayos realizados de excitación de la vibración por impulso están muy influenciados por la geometría de las piezas que son irregulares, medir la velocidad de propagación permitiría:

Eliminar los problemas de geometría variable
Obtener probablemente resultados más ajustados.