

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática y de
Telecomunicación

Análisis y caracterización dinámica de paneles sandwich fabricados con materiales compuestos



Máster Universitario en
Ingeniería de Materiales y Fabricación

Trabajo Fin de Máster

Alumno: Raúl Corvo Weinbach

Director: José Sancho Rodríguez

Pamplona, 28 de junio de 2018

RESUMEN

El presente trabajo consiste en calcular la relación de amortiguamiento de varios tipos de paneles sándwich fabricados con diferentes composites y núcleos. Para ello, se emplea el equipamiento necesario para realizar ensayos dinámicos en vibración libre y, así, poder comparar entre los diferentes especímenes.

Se va a describir toda la práctica realizada y la problemática surgida a raíz de los ensayos realizados, puesto que aparece un comportamiento dinámico característico de la vibración libre pero combinada con una modulación en amplitud que distorsiona las señales recogidas y, por tanto, los valores obtenidos.

Se plantean soluciones para mitigar dicha modulación y se mejoran las respuestas recogidas. Actualmente, se sigue mejorando el montaje del ensayo y se van a preparar una serie de artículos científicos que van a recoger los resultados del trabajo realizado.

PALABRAS CLAVE

composite, material compuesto, dinámica, sandwich, laminado, fabricar, modulación, amortiguamiento, vibración

ÍNDICE

MATERIALES COMPUESTOS	7
INTRODUCCIÓN.....	7
CONCEPTO	8
CLASIFICACIÓN	10
COMPONENTES.....	10
MEDIOS DE FABRICACIÓN.....	19
LÁMINAS Y LAMINADOS	23
CONCEPTO	23
PROPIEDADES ELÁSTICAS DE UNA LÁMINA	23
TIPOS DE LAMINADOS.....	24
PANELES SANDWICH	26
DINÁMICA DE ESTRUCTURAS.....	28
INTRODUCCIÓN.....	28
CONCEPTOS.....	29
VIBRACIONES LIBRES.....	30
MÉTODO DEL DECREMENTO LOGARÍTMICO	33
TRABAJO REALIZADO	34
FABRICACIÓN DE PROBETAS DE LAMINADOS.....	35
FABRICACIÓN DE PANELES SANDWICH.....	42
ENSAYO DINÁMICO	48
RESULTADOS Y ANÁLISIS	53
SOLUCIONES.....	58
CONCLUSIONES.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO I	64
ANEXO II	86

MATERIALES COMPUESTOS

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la Historia, el ser humano ha empleado los materiales que estaban a su alcance para poder fabricar los objetos necesarios para poder sobrevivir. Hoy en día, existen más de 50.000 materiales disponibles para los ingenieros con los que poder diseñar y fabricar los productos más óptimos destinados a sus aplicaciones correspondientes. Este rango de materiales va desde los más primigenios (cobre, hierro, latón...) hasta los más desarrollados a día de hoy (cerámicos, composites, aceros de alto rendimiento...). Debido a tan amplio rango donde elegir, los ingenieros se encuentran ante un reto a la hora de seleccionar el material y el proceso de fabricación adecuados.

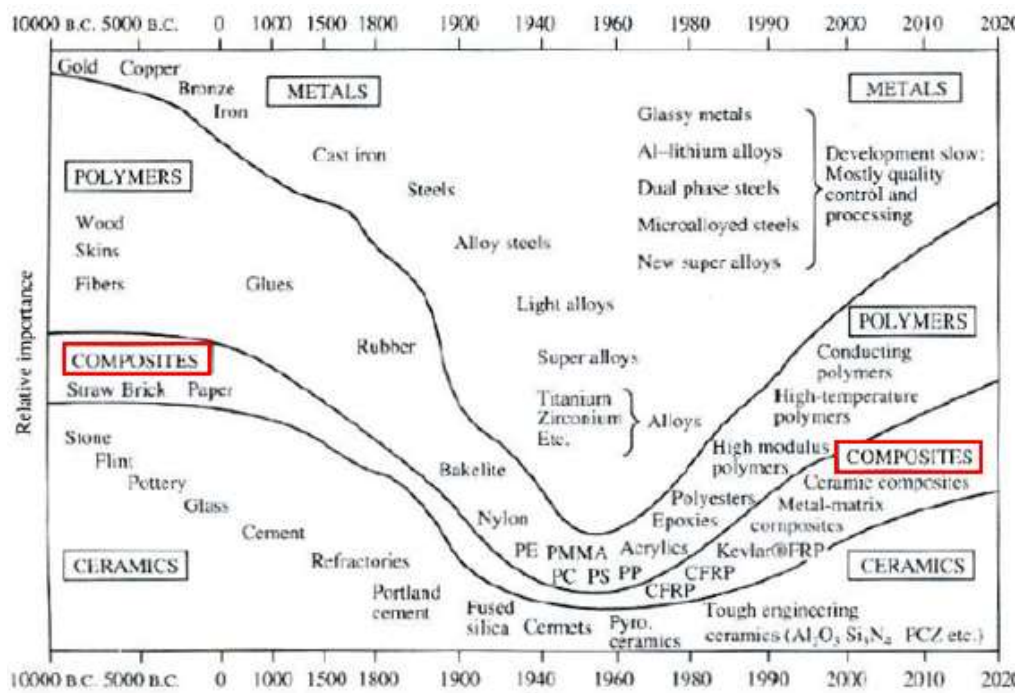


Fig. 1 Cronología de los materiales y su importancia a lo largo de la Historia

Estos materiales, dependiendo de sus principales características (rigidez, resistencia, densidad, temperatura de fundido...etc), pueden ser divididos en cuatro grandes grupos: metales, plásticos, cerámicos y **composites**. Cada grupo contiene un gran número de materiales con un amplio rango de propiedades que hace que en muchas ocasiones coincidan ciertos valores entre materiales de distintos grupos.

Los materiales compuestos, como la madera o el adobe, son algunos ejemplos que han existido desde la Antigüedad. A finales del siglo XX se produjo un impulso importante al estudio y desarrollo de este tipo de materiales. Concretamente, empezaron a llamar la atención de la industria los composites de matriz polimérica. Desde entonces, se han empleado en multitud de campos como la automoción, deporte o aeroespacial.

CONCEPTO

Un material compuesto o composite es aquel formado por dos o más materiales distintos cuyas propiedades finales son superiores y, posiblemente, únicas en algún aspecto respecto a los componentes de partida. Estos compuestos pueden diseñarse para conseguir combinaciones excepcionales de rigidez, peso, resistencia, dureza... etc. Cumplen las siguientes características:

- Están formados por dos o más materiales que se pueden distinguir a simple vista y separables mecánicamente.
- Presentan varias fases químicamente distintas, insolubles entre sí y separadas por una interfase.
- Sus propiedades mecánicas son superiores a la suma de las propiedades de sus componentes por separado.
- A nivel microscópico prácticamente todos los materiales están formados por dos o más constituyentes diferentes como son las aleaciones metálicas. En los materiales compuestos, a diferencia del resto de materiales, las diferencias son apreciables a nivel macroscópico.

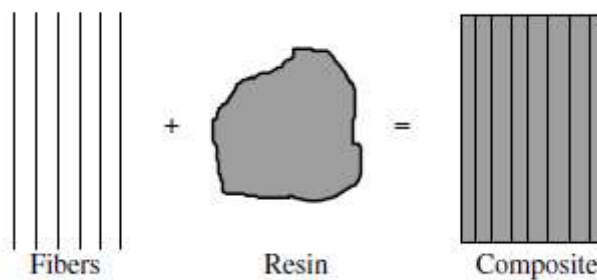


Fig. 2 Elementos de un composite

La aparición de estos materiales se debe al anhelo de mejorar el rendimiento de los productos existentes e incrementar la competitividad en el mercado. Actualmente, el ejemplo más claro es el reemplazo de muchos aceros y aluminios por estos materiales. En la mayoría de casos se consiguen mejorar las aptitudes finales del producto y, por lo tanto, se obtienen rendimientos superiores. En cuanto a reducción de peso, reemplazando los componentes de acero se puede llegar a ahorrar entre un 60-80% del peso del componente mientras que con el aluminio el ahorro es entre el 20-50%.

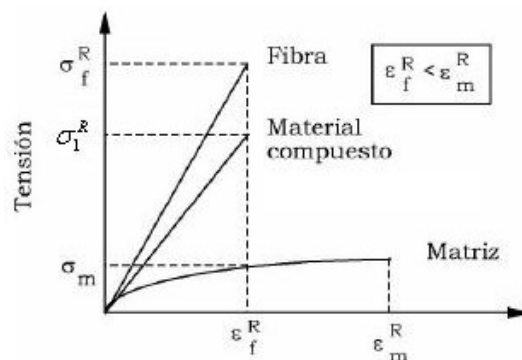


Fig. 3 Variación de propiedades al crear un composite

Material	Density (ρ) (g/cc)	Tensile Modulus (E) (GPa)	Tensile Strength (σ) (GPa)	Specific Modulus (E/ ρ)	Specific Strength (σ/ρ)	Max. Service Temp. (°C)
Metals						
Cast iron, grade 20	7.0	100	0.14	14.3	0.02	230–300
Steel, AISI 1045 hot rolled	7.8	205	0.57	26.3	0.073	500–650
Aluminum 2024-T4	2.7	73	0.45	27.0	0.17	150–250
Aluminum 6061-T6	2.7	69	0.27	25.5	0.10	150–250
Plastics						
Nylon 6/6	1.15	2.9	0.082	2.52	0.071	75–100
Polypropylene	0.9	1.4	0.033	1.55	0.037	50–80
Epoxy	1.25	3.5	0.069	2.8	0.055	80–215
Phenolic	1.35	3.0	0.006	2.22	0.004	70–120
Ceramics						
Alumina	3.8	350	0.17	92.1	0.045	1425–1540
MgO	3.6	205	0.06	56.9	0.017	900–1000
Short fiber composites						
Glass-filled epoxy (35%)	1.90	25	0.30	8.26	0.16	80–200
Glass-filled polyester (35%)	2.00	15.7	0.13	7.25	0.065	80–125
Glass-filled nylon (35%)	1.62	14.5	0.20	8.95	0.12	75–110
Glass-filled nylon (60%)	1.95	21.8	0.29	11.18	0.149	75–110
Unidirectional composites						
S-glass/epoxy (45%)	1.81	39.5	0.87	21.8	0.48	80–215
Carbon/epoxy (61%)	1.59	142	1.73	89.3	1.08	80–215
Kevlar/epoxy (53%)	1.35	63.6	1.1	47.1	0.81	80–215

Fig. 4 Propiedades de diversos materiales

Por poner un ejemplo, en la industria aeronáutica se requieren de materiales ligeros, rígidos y resistentes al desgaste, la corrosión y al impacto. Es muy complicado emplear un material convencional que pueda cumplir con todos los requerimientos mencionados. Sin embargo, los composites cumplen con prácticamente todas las condiciones y, como se aprecia en la figura, van reemplazando a una gran parte de los materiales originales.

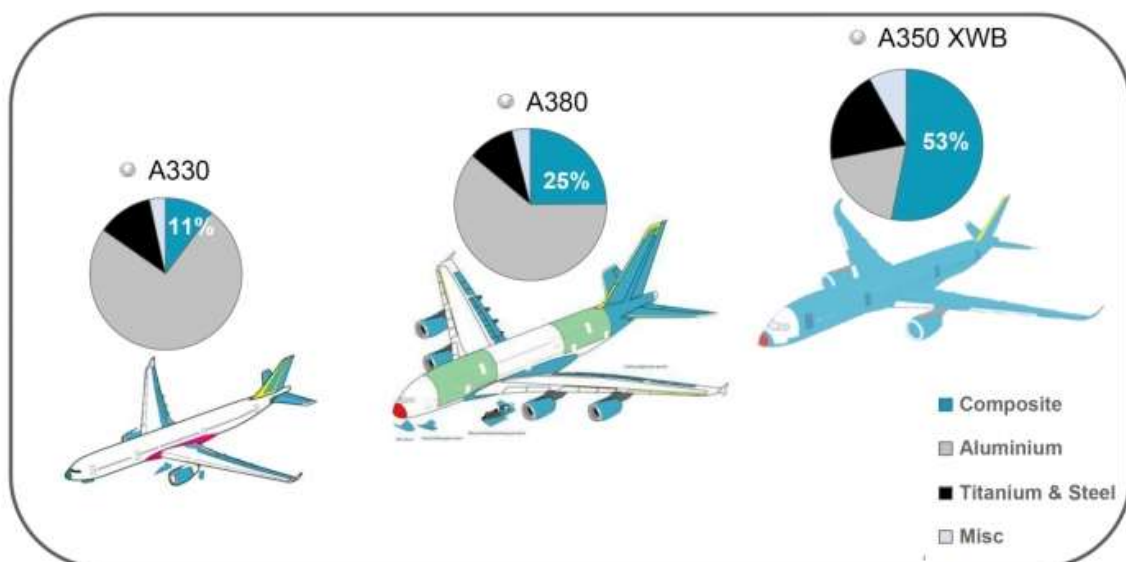


Fig. 5 Evolución de la presencia de materiales compuestos en aeronáutica

CLASIFICACIÓN

Como se ha mencionado en la introducción, los composites han existido siempre en nuestro entorno. Por ello, podemos considerar que existen de forma natural y artificial. Estos últimos pueden estar formados por diferentes tipos de fibra y matriz, tanto por el tipo de material como por su morfología. Una posible clasificación sería la siguiente:

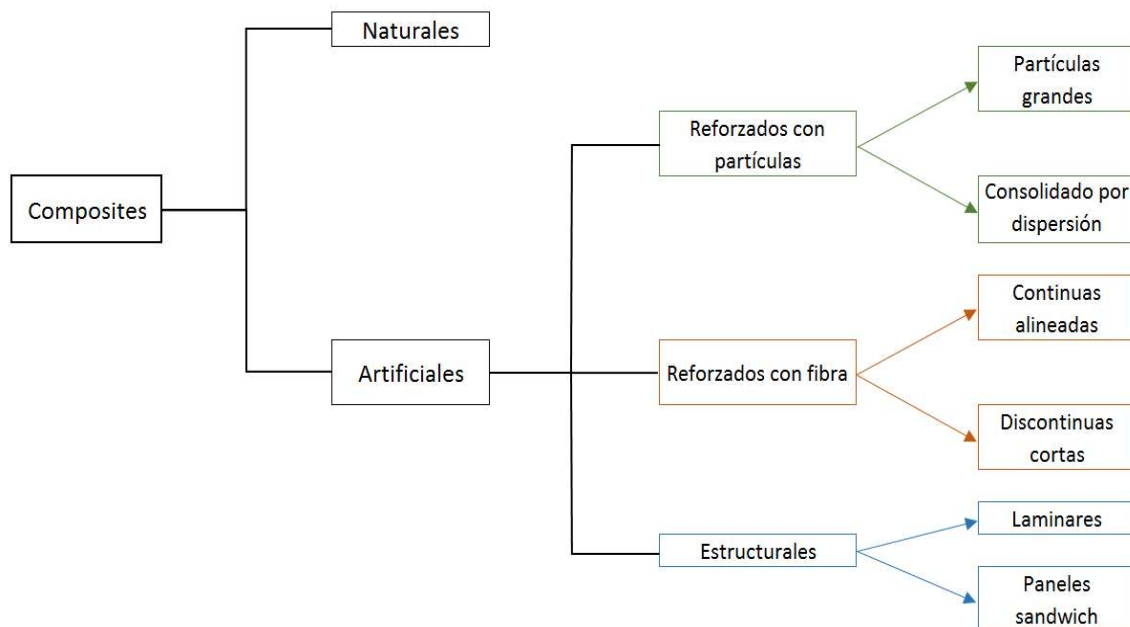


Fig. 6 Clasificación general de los materiales compuestos

COMPONENTES

Como ya se ha mencionado, los materiales compuestos están constituidos por fibras y matriz. En este punto se van a desarrollar ambos componentes de acuerdo al esquema presentado anteriormente.

FIBRAS

Las fibras son las encargadas de soportar la mayor parte de los esfuerzos y se suelen presentar en forma de capas o láminas superpuestas en la dirección del espesor de las piezas. Por ello, se suele hablar de laminados en los materiales compuestos y tanto la orientación de las diferentes láminas entre ellas como con el eje de aplicación de las cargas influyen de manera importante en las propiedades finales de las piezas. Tampoco es conveniente que todas las fibras estén únicamente orientadas en la dirección de la carga puesto que una variación en la dirección de ésta provocaría la rotura progresiva de las capas del material. Es por ello que siempre se apilan láminas en diferentes direcciones.

Las fibras empleadas en la industria pueden presentar diferentes arquitecturas. Las más empleadas son las siguientes:

- MATS o tejidos de hilos cortados (en general, de fibra de vidrio)
- Unidireccionales
- Bidireccionales o biaxiales

- Tejidos combinados MAT-tejido
- Tejidos multiaxiales
- Tejidos 3D

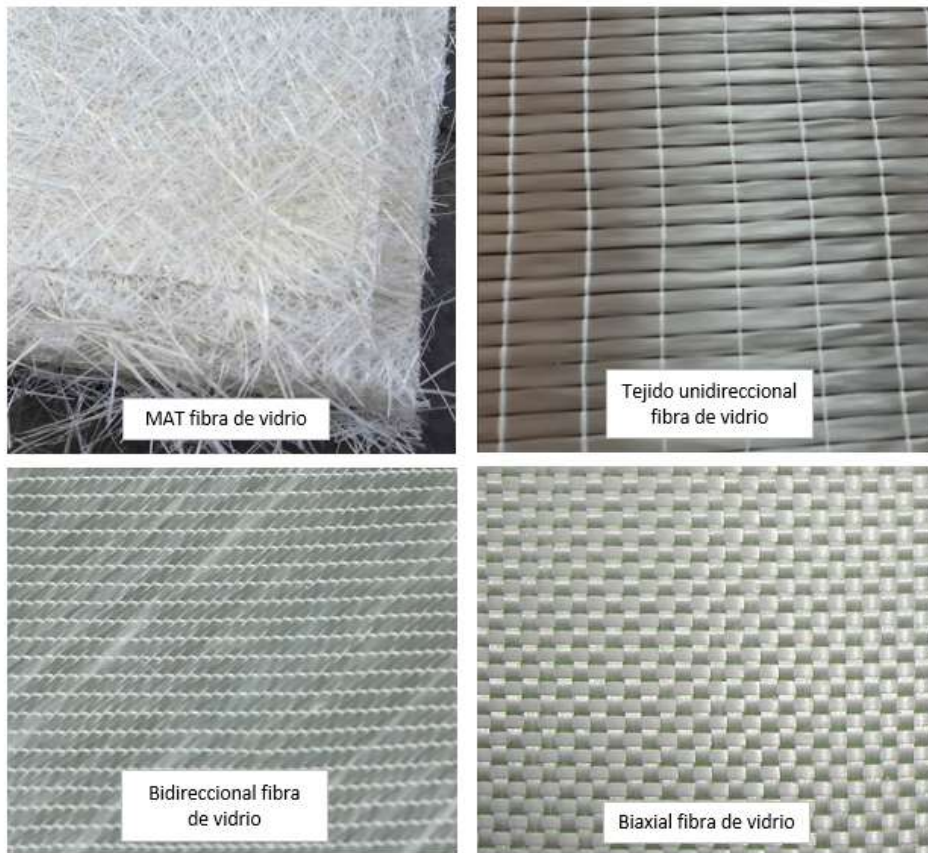


Fig. 7 Diferentes arquitecturas para fibra de vidrio

A modo de aclaración, un bidireccional no es similar a un biaxial. Un bidireccional es un tejido “tejido”, es decir, se entrelazan las fibras de las direcciones principales (sarga y satén). Un biaxial son dos capas unidireccionales unidas sin entrelazar. Éstas se cosen con hilo y se suele denominar tejido “no tejido”.

Existe un universo de arquitecturas puramente estéticas donde se juega con el entrelazado de fibras a sarga y satén para generar láminas muy vistosas y atractivas. Se presentan algunos ejemplos en la Fig.8.

En cuanto al tipo de material de estas fibras, existen una gran variedad y es un campo en continuo desarrollo. Las más tradicionales son las siguientes:

- Fibras de vidrio
- Fibras de carbono
- Fibras de aramida
- Fibras cerámicas
- Otras fibras
- Tejidos híbridos

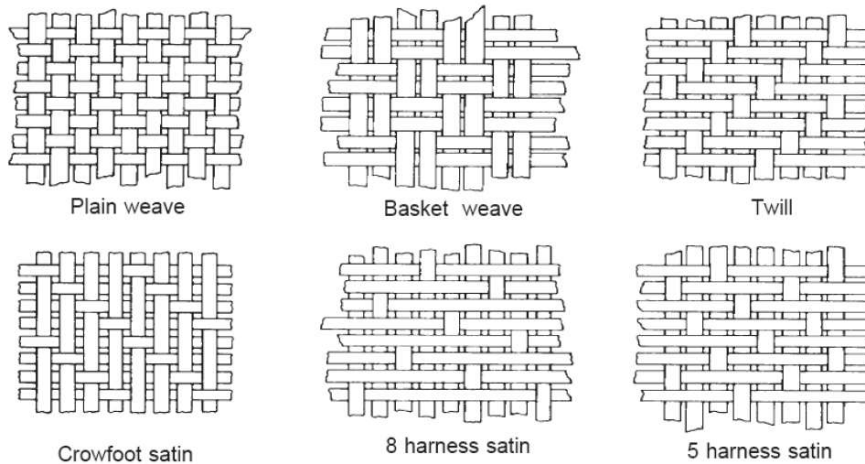


Fig. 8 Diferentes arquitecturas adoptadas por los tejidos estéticamente

FIBRAS DE VIDRIO

Principalmente, empleamos este material si buscamos piezas de baja densidad y con una relación prestación/coste aceptable. Su componente principal es el silicio y compite con el aluminio en cuanto a peso y las propiedades mecánicas del vidrio son mucho mejores que las del aluminio convencional. Además, cabe destacar que las fibras de vidrio solas (sin matriz) tienen unas propiedades muy competitivas respecto al carbono, pero disminuyen combinadas con una matriz. La Fig.7 presenta diferentes configuraciones de la fibra de vidrio y sus principales ventajas son las siguientes:

- Bajo precio
- Buena estabilidad dimensional debido a su bajo coeficiente de dilatación
- Buenas resistencia al fuego
- Buen dieléctrico y aislante
- Buenas propiedades mecánicas respecto a materiales convencionales

FIBRAS DE CARBONO

Estas fibras son las más empleadas por su baja densidad y sus excelentes propiedades, superiores a las fibras de vidrio. Para tener una idea de sus propiedades, basta decir que su módulo específico (rigidez/peso) es del orden de unas 70 veces el de las aleaciones normales de aluminio. Sin embargo, este material es bastante más caro que el vidrio (aproximadamente, una relación 5/1).



Fig. 9 Tejido y pieza, respectivamente, fabricadas con fibra de carbono

Existen diferentes tipos de fibras de carbono en función del precursor que se utilice en su elaboración y de las variaciones en el proceso. El precursor es, por así decirlo, la materia prima para producir las fibras de carbono. El más común es el poliacrilonitrilo (PAN) del que se obtienen las fibras con las mejores propiedades, pero también hay otros precursores como el "pitch" o la celulosa. Por otra parte, si variamos un punto del proceso de producción obtenemos las siguientes familias:

HS = "High Strength". Es la más habitual.

IM = "Intermediate Modulus". Es rara, cara y es para usos muy concretos.

HM = "High Modulus".

En cuanto a sus propiedades, podemos afirmar las siguientes:

- Es más resistente, rígido y menos denso que el vidrio.
- Respecto al vidrio, es conductor eléctrico. Pero comparado con un conductor eléctrico, es un aislante.
- Posee un coeficiente de dilatación negativo. Muy interesante para aplicaciones espaciales.
- No tiene ni la transparencia ni la transmisión magnética del vidrio. Apantalla las señales magnéticas.

FIBRAS DE ARAMIDA

El vidrio es un mineral (hecho por silicio), el carbono es un elemento (materia prima rica en carbono) y la fibra de aramida es un plástico. Se tratan de fibras hechas a partir de materiales termoplásticos y sus propiedades y precio se encuentran entre el vidrio y el carbono.



Fig. 10 Tejido de aramida y ejemplo de aplicación

En el mercado se suele reconocer este material bajo los nombres de Kevlar, Twaron o Technora. Sin hacer excesiva distinción, hay tres tipos de fibras de aramida y, entre ellas, su diferencia es la rigidez.

Podemos destacar que se trata de la fibra más ligera de las tres que hemos visto, bastante rígida tratándose de un plástico y dúctil. Su punto fuerte es su elevada resistencia al desgaste, al impacto y posee un buen comportamiento a fatiga.

Sin embargo, sus desventajas son su elevada absorción de agua (pérdida de propiedades mecánicas), es combustible y puede degradarse al exponerse a la luz ultravioleta. Además, no puede operar a grandes temperaturas. A temperaturas de 200-250°C pierde en torno al 20-25% de sus propiedades mecánicas.

OTRAS FIBRAS

Se van a mencionar una serie de fibras especiales, de baja utilización debido a su reciente producción, coste o campos de aplicación reducidos:

- Fibras de basalto
- Fibras de boro
- "Dyneema"
- "Innegra"

A continuación, se presenta una tabla que recoge las propiedades más características de la mayoría de las fibras que hemos visto.

Fiber	Modulus [Gpa]	Tensile Strength (*) [GPa]	Compression Strength [GPa]	Elongation [%]	Density [gr/cc]	Longitudinal Thermal Expansion [10 ⁻⁴ /°C]	Transverse Thermal Expansion [10 ⁻⁴ /°C]	Poisson Ratio	Thermal Conduct [W/m°C]	Maximum Operating Temperature [°C]	Resistivity [micro ohm-m]
E-Glass	72.345	3.45	-	4.4	2.5-2.59	5.04-5.4	-	0.22	1.05	550	-
S-Glass	85	4.8	-	5.3	2.46-2.49	1.6-2.9	-	0.22	1.05	650	-
C-Glass	69	3.31	-	4.8	2.56	6.3	-	-	1.05	600	-
D-Glass	55	2.5	-	4.7	2.14	3.06	-	-	-	477	-
Carbon											
T300	230	3.53	-	1.5	1.75	-0.6	7-12	0.2	3.06	-	18
M50	490	2.45	-	0.5	1.91	-	-	-	54.43	-	8
AS2	227	2.756	-	1.3	1.8	-	-	-	8.1-9.3	-	15-18
AS4-D	241	4.134	-	1.6	1.77	-0.9	-	-	8.1-9.3	-	15-18
IM6	275.6	5.133	-	1.73	1.74	-	-	-	8.1-9.3	-	15-18
HMS4	317	2.343	-	0.8	1.8	-	-	-	64-70	-	9-10
UHM	441	3.445	-	0.8	1.85	-	-	-	6.5	-	120
P55	379	1.9	-	0.5	2	-1.3	-	-	120	-	8.5
P100	758	2.41	-	0.32	2.16	-1.45	-	-	520	-	2.5
Kevlar 29	62	3.792	-	-	1.44	-	-	-	-	-	-
Kevlar 49	131	3.62	0.72	2.8	1.45	-2	59	0.35	0.04	160 (#)	-
Kevlar 149	179	3.62	0.69	1.9	1.47	-	-	-	-	-	-
Technora H	70	3	0.6	4.4	1.39	-6	59	0.35	-	160 (#)	-
Boron	400	2.7-3.7	6.9	0.79	2.57	4.5	0.2	0.2	38	315 (#)	-
SCS-6	427	2.4-4	-	0.6	3	4-4.8	-	0.2	10	-	-
Nextel 720	260	2.1	-	-	3.4	6	-	-	-	1200 (#)	-

Fig. 11 Propiedades de diversas fibras de material compuesto

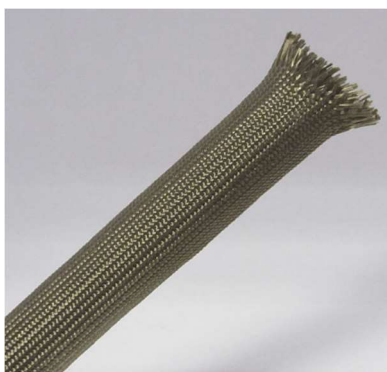


Fig. 12 Tejido de basalto



Fig. 13 Tejido + fibra de basalto + innegra

TEJIDOS HÍBRIDOS

Se va a comentar un poco la definición de tejido híbrido ya que es un concepto empleado en la industria actual.

Se tratan de tejidos en los que combinamos diferentes tipos de fibras de acuerdo a las sollicitaciones que vaya a sufrir la pieza. Por ejemplo, si en el interior buscamos buena rigidez y en el exterior resistencia al impacto podemos colocar láminas de carbono en el interior y láminas de aramida en el exterior.

Podemos hibridar todo tipo de fibras mientras empleemos la misma matriz al conjunto. En el caso de mezclar matrices, el proceso se vuelve mucho más delicado. También podemos hacer tejidos “tejidos” en los que a sarga pongamos fibras de carbono y a satén fibras de aramida. Las más usuales son las siguientes:

- Carbono/aramida
- Aramida/vidrio
- Carbono/vidrio

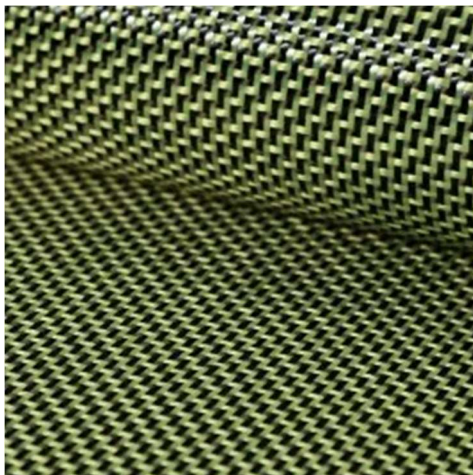


Fig. 14 Tejido de fibra de aramida + carbono



Fig. 15 Tejido de fibra de carbono + innegra

MATRIZ

Podemos definir la matriz como el componente encargado de realizar las siguientes funciones:

- Dar una geometría concreta a la pieza con ayuda de un molde
- Transmitir las cargas entre todas las fibras
- Distribuir las cargas entre capas en caso de rotura de alguna
- Proporcionar un acabado superficial final
- Aislar a las fibras del exterior y evitar su desgaste

La matriz se compone de una resina base a la que se le añaden otros componentes para modificar la cinética de la reacción y sus propiedades. Es muy importante respetar los porcentajes y tiempos recomendados por los proveedores ya que, de lo contrario, podemos obtener piezas con unas prestaciones muy inferiores a las deseadas. Podemos clasificar las matrices de la siguiente manera:

- **Matrices orgánicas:** también denominadas poliméricas o plásticas. Para fibra larga son las más empleadas (aproximadamente en el 99,9% de los casos).
- **Matrices cerámicas:** son raras de ver debido a su elevado coste. El caso más conocido es en los discos de freno de altas prestaciones.
- **Matrices metálicas:** despiertan un gran interés pero actualmente no existen novedades que permitan quitarles terreno a las orgánicas.

Dentro de las matrices orgánicas podemos diferenciar entre dos tipos: **termoestables** (proceso irreversible) y **termoplásticas** (proceso reversible). Las más empleadas son las termoestables (aprox. 95% casos) debido a su estado más líquido, fácil manipulación y su relación calidad/precio. Además, las matrices termoplásticas requieren de una presión y temperatura superiores a las matrices termoestables.

La matriz es determinante en el proceso de fabricación, tanto a nivel de proceso (temperatura, presión) como de almacenamiento (condiciones ambientales...etc). Elegir la matriz adecuada es fundamental en términos de productividad, ya que depende de su tiempo de curado, post-procesos necesarios...etc.

Existen un gran número de matrices orgánicas termoestables. De todas ellas, hay dos que son las más extendidas en uso:

- **Poliéster**
- Viniléster
- **Epoxi**
- Bismaleimida (BMI)
- Poliimida
- Fenólicas
- Urea formol

POLIÉSTER

El poliéster es la resina termoestable más empleada debido a su bajo coste y buenas prestaciones finales en las piezas. Esta matriz se suele combinar con fibras de bajo coste como las fibras de vidrio, fibra corta o MAT. Dentro del poliéster destacan dos familias:

- Ortoftálicas: primera matriz existente.
- Isoftálicas: evolución de las primeras, con mejores propiedades. Las más empleadas.

En general, esta matriz se adquiere en forma líquida con el endurecedor ya mezclado y disuelta en estireno para evitar que espese en exceso. A esta matriz se le añade un catalizador antes de darle uso, el cual permite aumentar o disminuir la reacción química de la matriz.

Entre sus ventajas, destacan las siguientes:

- Tiempo de curado corto (aprox. 15-20min).
- Gracias al estireno posee una baja viscosidad, lo cual facilita su uso.
- Es posible curar a temperatura ambiente gracias al catalizador.
- Buena resistencia eléctrica y al fuego.
- Buenas propiedades finales en pieza, aunque inferiores a otras matrices (p.e, epoxi).

Por supuesto, se mencionan una serie de desventajas:

- Durante el curado, la matriz se contrae debido a las emisiones de estireno.
- En el curado las emisiones de estireno son tóxicas. Requiere ventilación.
- Debido a la reacción exotérmica que se genera, es muy complicado obtener grandes espesores de pieza debido al pico de temperatura que se alcanza. Puede llegar a quemarse la matriz.

A nivel de aplicaciones, destacan como “gel coats” (es decir, como capa final de acabado en una pieza), en la industria aeroespacial, aplicaciones domésticas, automoción, construcción...etc.

Properties	Isophthalic polyester resin	Orthophthalic polyester resin
Density ^a (g/cm ³)	1.1	1.1
Styrene monomer content ^a (%)	39–44	39–44
Viscosity (Brookfield), 25 °C, 60 rpm (cps) ^b	538	426
Barcol hardness ^b	56	47
Tensile strength ^b (MPa) [16]	7	6
Tensile modulus ^b (MPa) [16]	300	270

Fig. 16 Propiedades de las dos familias de resina poliéster

EPOXI

La resina epoxi, como ocurre entre la fibra de vidrio y el carbono, es de mayor calidad que la resina de poliéster. Su uso es bastante amplio en la industria pero hay menos variedades a elegir. Distinguimos dos familias de epoxi:

- Convencional: más barata y frágil.
- Endurecida: mayor tenacidad.

A diferencia del poliéster, esta matriz se adquiere con el catalizador ya combinado y hasta que no se le añade el endurecedor (30-50%) y se aplican las condiciones adecuadas, no solidifica. Es muy importante respetar los ratios porcentuales de endurecedor para no arruinar las propiedades de la pieza final. Otra diferencia respecto al proceso de curado del poliéster es que, al principio, requiere de un aporte de temperatura. Luego, al tiempo, el proceso es exotérmico y se generan unos picos de temperatura que hay que controlar.

Como ventajas, podemos mencionar las siguientes:

- Excelentes propiedades mecánicas y bajo peso
- Resistencia a temperaturas muy amplia
- Buen comportamiento a fatiga y muy tenaz
- Buenas propiedades frente a agentes químicos
- Mejor adherencia de las fibras que en poliéster
- Variación de volumen inferior al poliéster
- Menos inflamable que el poliéster
- Ausencia de toxicidad en el proceso de curado
- Muy modificables

Y como desventajas, se destacan:

- Precio superior al poliéster (en torno a 3÷4 veces)
- Proceso de curado más delicado
- Proceso de fabricación más complejo
- Tiempo de curado, en general, superior a otras resinas

Por último, estas matrices se emplean principalmente en el revestimiento de suelos, en la industria alimentaria, aeronáutica. También se comercializa como adhesivo y en pinturas.

Property	Epoxy	Polyester
Viscosity at 25 °C μ (cP)	12000-13000	250-350
Density ρ (g.cm ⁻³)	1.16	1.09
Heat Distortion Temperature HDT (°C)	50	54
Modulus of elasticity E (GPa)	5.0	3.3
Flexural strength (MPa)	60	45
Tensile strength (MPa)	73	40
Maximum elongation (%)	4	1

Fig. 17 Comparación de las propiedades de las resinas epoxi y poliéster

MEDIOS DE FABRICACIÓN

En la elaboración de piezas con material compuesto son tan importante las materias primas y su calidad como el proceso de fabricación seleccionado. En este punto se van a comentar los procesos más extendidos en esta industria.

En todo proceso de fabricación con material compuesto se realizan los siguientes pasos: preparación del molde, aplicación de desmoldeante y, de manera opcional, gel coat. A partir de este punto es cuando empiezan las diferencias a nivel de maquinaria y método de aplicación de los componentes. En general, existen tres métodos de fabricación:

- Método manual: todo se hace a mano. Dentro del manual tenemos dos opciones:
 - Moldeo por contacto (fibra larga)
 - Moldeo por proyección (fibra corta)
- Método semiautomático: la ayuda está en la compactación de la fibra con la matriz. La colocación de láminas y demás elementos se hace de forma manual. Destacan:
 - Bolsa de vacío (opción de complementar con un **autoclave**)
 - Resin Transfer Moulding (RTM)
 - Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM)
 - Resin Infusion Moulding (RIM)
- Método automático: todo se hace con máquinas.
 - Pultrusión
 - Filament Winding
 - Fiber Placement
 - Automatic Tape Laying (ATL)
 - Sheet Moulding Compound (SMC)
 - Bulk Moulding Compound (BMC) } Fibra corta

Voy a centrarme en explicar las técnicas subrayadas en la lista debido a que son las más asequibles y relevantes para entender el proceso de elaboración de probetas aplicado a este trabajo.

MÉTODO MANUAL

El moldeo manual agrupa aquellas técnicas en las que la habilidad del operario resulta fundamental para obtener un material compuesto bien hecho. También conocida como laminado manual en vía húmeda, todas las propiedades mecánicas y su aspecto físico finales dependerán de lo bien que lo haya realizado el operario o grupo de operarios durante el proceso. En general, se emplean resinas cuya temperatura de curado es igual a la del ambiente de trabajo.

MOLDEO POR CONTACTO

Esta técnica consiste en ir colocando capas de material sobre el molde y se va depositando resina de acuerdo a la que necesite el refuerzo. Con un rodillo o una brocha se va repartiendo la resina por toda la superficie del material y, gracias a la presión ejercida por estas herramientas, las fibras se van impregnando de la resina. Es necesario un valor mínimo de presión para que la resina se reparta por toda la capa. Influye la geometría de la pieza, la viscosidad de la resina, el corte de las capas, el operario...etc.

El único inconveniente que puede surgir con esta técnica es, sobre todo, con la geometría del molde porque puede haber un radio inferior al radio del rodillo empleado y no estaríamos compactando en esa zona concreta. También, si existen ángulos superiores a 50-60 grados pueden aparecer problemas.

MOLDEO POR PROYECCIÓN

A diferencia del moldeo por contacto, se emplea una pistola especial en cuyo interior se realiza, por un lado, el corte de hilos de fibra en trozos de varios milímetros y, por otro lado, se dispara la resina contra el molde. La combinación de fibra y resina se realiza a la salida de la pistola.

Se suelen fabricar piezas de un tamaño medio-grande con formas no muy complejas y donde no sean necesarias unas propiedades mecánicas exigentes. Es muy importante controlar los espesores depositados ya que no estamos colocando capas con un espesor conocido.

Ambos procesos pueden llegar a combinarse según la aplicación final deseada de la pieza. Por ejemplo, si necesitamos un refuerzo en alguna zona, primero se aplica la capa de material con resina mediante rodillo y luego se proyecta con pistola el resto del molde.



Fig. 18 Moldeo por contacto



Fig. 19 Moldeo por proyección

MÉTODO SEMIAUTOMÁTICO

Como ya se ha mencionado, en estos procesos de fabricación se recibe apoyo externo en alguna de las fases del proceso, como puede ser en la compactación o en la impregnación automática de las fibras en resina.

BOLSA DE VACÍO

El objetivo de esta técnica es obtener piezas con propiedades muy superiores. También se busca una calidad excelente, es decir, una alta repetitividad. Básicamente, consiste en colocar de forma manual las láminas y la resina pero, durante el proceso de curado, nos ayudaremos de una bolsa de vacío sellada en el perímetro del molde por la que se va a aplicar presión de vacío para su correcta compactación.

Inicialmente, preparamos el molde (limpieza + desmoldeante + *gel coat* (opcional)) y seguimos el mismo proceso que el laminado manual, esto es, colocamos una lámina, vertemos la cantidad necesaria de resina y con un rodillo la distribuimos de manera que quede repartida equitativamente por toda la superficie del material compuesto. Se realiza este procedimiento con el resto de elementos a apilar.

A continuación, sobre el laminado se colocan las siguientes capas en el orden que se va a indicar:

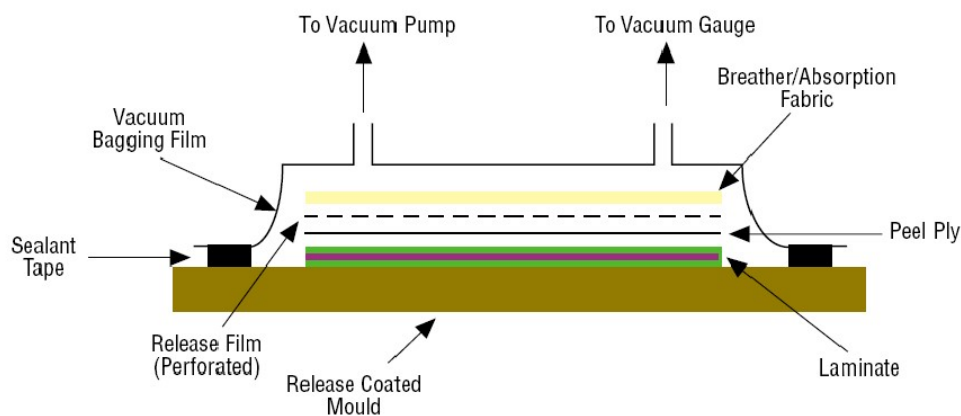


Fig. 20 Esquema de montaje por bolsa de vacío

1. *Peel Ply* (opcional)

Se trata de un tejido fino, poroso y no adherente al laminado. Permite que la resina en exceso se purgue y da una textura final al laminado adecuada para una mejor adhesión de la siguiente lámina o laminado.

2. *Release Film*

Es un plástico microperforado según un patrón concreto a petición del cliente. Por ejemplo, si se emplea un tejido preimpregnado necesitaré un film con menos agujeros de lo habitual. Permite el paso del exceso de resina a capas superiores.

3. *Breather*

También denominado “manta aireadora”, se trata de un fieltro de fibra sintética la cual permite y distribuye el vacío y absorbe el exceso de resina.

4. *Bolsa de vacío*

Lámina plástica con capacidad para estirarse y adaptarse a la forma de la pieza, buena resistencia mecánica y química.

Después, se procede al cierre hermético de la bolsa con ayuda de una pasta de textura gomosa y a la aplicación del vacío. Se debe estar muy seguro de que la bolsa esté perfectamente cerrada y que no tenga poros y fugas en los cierres. Este paso es de los más delicados porque si el vacío falla, la pieza sería mala. La cantidad de vacío necesario se obtendrá de forma empírica por prueba y error. En líneas generales, un laminado grueso necesita más vacío que uno fino y una resina viscosa necesita más vacío que una fluida.

Cuando se compactan los laminados, hay resina que tiene que evacuar. Esta resina se escapa por el *release film* y queda absorbida por el *breather*. Esto es muy importante porque, de no ocurrir esto último, la resina puede llegar a la bomba de vacío y estropearla.

En general, el proceso de curado por bolsa de vacío se realiza en **autoclave**. Se trata de una cámara compacta que aísla la pieza del exterior y le aplica calor y presión adicional al vacío aplicado.



Fig. 21 Ejemplo de un autoclave industrial

LÁMINAS Y LAMINADOS

CONCEPTO

Una lámina es la parte básica de un laminado que resulta al combinar la matriz con las fibras. Dentro de la lámina, las fibras pueden estar o bien todas en una dirección o en perpendicular entre sí formando un tejido.

El apilamiento de estas láminas da lugar a lo que se denomina laminado. Conociendo las propiedades del material, las solicitaciones a las que está sometido el laminado y aplicando la Teoría Clásica sería posible variar las orientaciones para obtener la configuración idónea para una aplicación concreta.

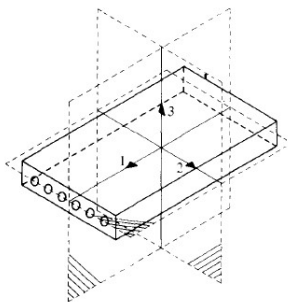


Fig. 22 Planos principales en una lámina ortótropa

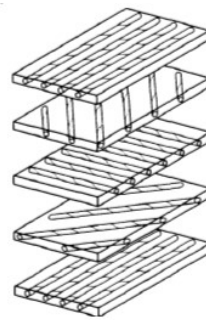


Fig. 23 Apilado de láminas

PROPIEDADES ELÁSTICAS DE UNA LÁMINA

Para conocer el comportamiento elástico de un material se plantea la ley de Hooke, la cual relaciona las deformaciones en función de la carga a la que se somete dicho material. No todos los materiales poseen las mismas propiedades mecánicas en todas las direcciones. En general, los materiales compuestos se consideran ortótropos y eso hace que se puedan aplicar ciertas simplificaciones a la hora de hacer cálculos.

La ley de Hooke se expresa como:

$$\sigma = E\varepsilon$$

y la ley de Hooke generalizada tiene la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}$$

que es la notación matricial para seis ecuaciones que relacionan esfuerzos con deformaciones.

Esta ley es la más general para un material anisótropo linealmente elástico. Son necesarias 36 componentes para definir un material que no presenta simetría alguna. Puede demostrarse que $C_{ij}=C_{ji}$, por lo que se reducen a 21 constantes elásticas independientes.

Para nuestro caso, el material compuesto se considera ortótropo, lo cual implica que tiene tres planos de simetría perpendiculares entre sí. Debido a ello, la matriz de rigidez de la ley de Hooke generalizada queda de la siguiente manera:

$$[C] = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix}$$

Esta matriz resultante es la base empleada para todos los futuros cálculos en el estudio de una lámina bidireccional, que es el caso fundamental analizado en la Teoría Clásica. Desarrollando la teoría a partir de lo explicado y conociendo las sollicitaciones, orientaciones de las fibras y tipo de material se puede calcular los esfuerzos y deformaciones que sufren las láminas y, por supuesto, los laminados.

TIPOS DE LAMINADOS

La gran ventaja de estos materiales es la gran variedad existente para combinarse entre sí para formar los laminados. Una lámina por sí sola no es capaz de soportar las cargas reales de una aplicación determinada debido a su reducido espesor. Además, en el caso de una lámina unidireccional, sus propiedades en la dirección perpendicular a las fibras son muy reducida, por lo que fallaría con todas las garantías con una pequeña variación en la dirección de las sollicitaciones.

En general, las variables que determinan un laminado son las siguientes:

- Número de capas y su espesor
- Posición de cada capa dentro del laminado
- Material de cada capa
- Orientación de cada capa

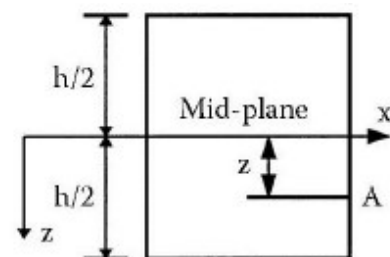


Fig. 24 Posición de capas respecto al plano medio

La adecuada selección en cada una de las variables mencionadas puede generar simplificaciones a la hora de calcular los esfuerzos y deformaciones que sufre cada una de las láminas del laminado. Es crítico dar con la configuración de laminado más acorde a la aplicación final de la pieza. A continuación, se destacan algunos laminados:

- Laminados simétricos. Láminas del mismo material, espesor y orientación, dispuestas simétricamente respecto al plano medio. Ejemplo: $[0/30/\overline{60}]_s$

0
30
60
30
0

- Laminados anti-simétricos. Las capas que ocupan posiciones simétricas tienen orientaciones del mismo ángulo pero con signo distinto. Son del mismo material y espesor. Ejemplo: $[45/60/-60/-45]$

45
60
-60
-45

- Laminados cruzados. Sólo tienen las láminas orientadas a 0 o a 90 grados. Ejemplo: $[0/90_2/0/90]$

0
90
90
0
90

- Laminados a $\pm\alpha$. Sólo tienen las láminas orientadas en una dirección y su opuesta. Ejemplo: $[-40/40/-40/40]$

-40
40
-40
40

- Laminados balanceados. Por cada lámina $+\alpha$ hay otra a $-\alpha$, y por cada una a 0 grados hay otra a 90 grados. Ejemplo: $[0/45/90/-45]$

0
45
90
-45

- Laminados cuasi-isotrópicos. El laminado se comporta como una placa isótropa. Elaboración compleja de la configuración. Ejemplo: $[0/\pm 60]$, $[0/\pm 45/90]_s$

0
± 60

0
± 45
90
90
± 45
0

PANELES SANDWICH

En este apartado voy a introducir y explicar brevemente los paneles “sándwich”, los cuales son uno de los grupos estructurales más empleados en el mundo de la Ingeniería. Se obtienen ensamblando, por pegado con adhesivos o por soldadura, dos láminas delgadas (denominadas pieles o **capas**) y una placa gruesa de material ligero (denominado **núcleo**). Las pieles poseen unas prestaciones mecánicas altas mientras que el núcleo suele ser de un material “blando” con unas propiedades mecánicas inferiores a las de las capas.

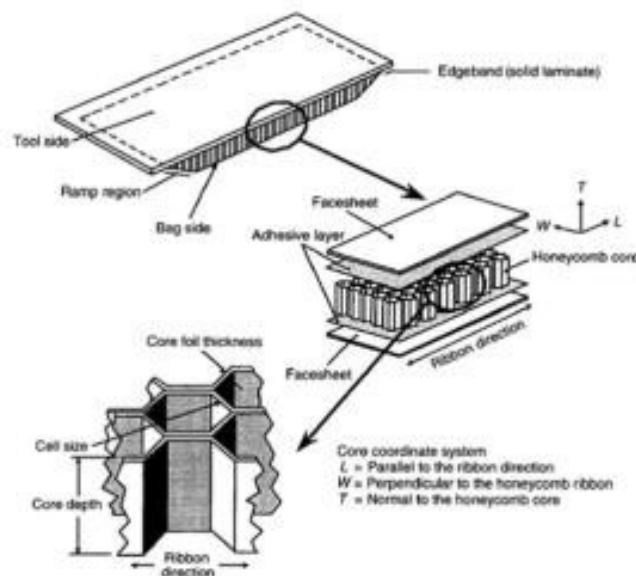


Fig. 25 Estructura sandwich con núcleo de panal de abeja o “honeycomb”

Existen dos motivos fundamentales que llevan al empleo de estos materiales en multitud de ámbitos industriales:

- 1) **Ligereza.** Obtenemos un comportamiento mecánico excelente eliminando gran cantidad de material gracias a cómo está constituido el panel en sí para soportar las cargas requeridas.
- 2) **Rigidez a flexión.** Al flexionarse un elemento estructural, las tensiones máximas se producen en las superficies superior e inferior y es nula en el plano medio. En cambio, la cortante es máxima en el centro de la sección, reduciéndose a un valor nulo en los extremos. Por ello, tiene sentido emplear materiales muy resistentes como pieles y materiales poco resistentes y ligeros como núcleo.

En general, el espesor del núcleo es muy superior al de las capas. Como la cortante máxima a flexión disminuye con la dimensión de la sección, es lógico que el espesor del núcleo sea mayor que el de las capas.

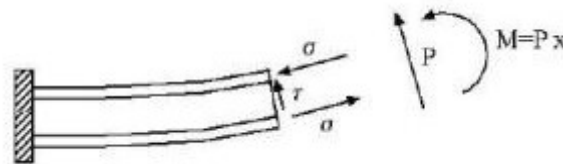


Fig. 26 Esquema de un perfil empotrado a flexión

En la siguiente figura se muestra una comparación entre la rigidez a flexión, la resistencia y peso de varias configuraciones estructurales para una placa. La primera, de izquierda a derecha, corresponde a una placa de aluminio de espesor t . En la segunda y la tercera, las pieles son de aluminio.

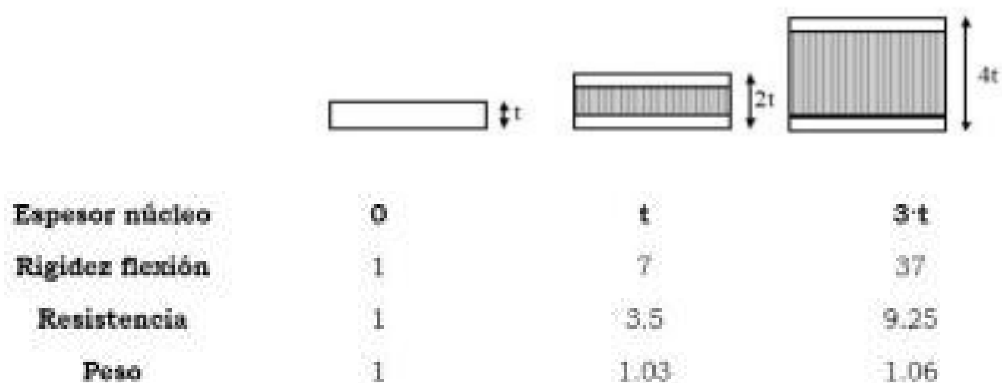


Fig. 27 Comparación entre la variación de peso y propiedades mecánicas

De la comparación podemos concluir lo que se viene afirmando en los párrafos precedentes, que con una ganancia ínfima de peso obtenemos un incremento sustancial en resistencia y rigidez a flexión de las estructuras tipo “sándwich”.

Los materiales más empleados como pieles son las aleaciones de aluminio y los composites, concretamente de matriz polimérica reforzados con fibras. El aluminio tiene un alto módulo específico, pero sin un tratamiento superficial se corroe y es débil frente a impactos. Los composites, como carbono/epoxi y vidrio/epoxi, se están empleando cada vez más debido a su alto módulo específico y resistencia a la corrosión.

En cuanto al núcleo, los materiales más comunes son la madera, la espuma y los paneles o "honeycomb". Los paneles suelen estar hechos de plásticos, papel, cartón...etc y sus propiedades mecánicas dependen del material empleado, el tamaño de las celdas y del espesor.

DINÁMICA DE ESTRUCTURAS

INTRODUCCIÓN

Esta introducción tiene como objetivo exponer de forma resumida algunos aspectos teóricos de las vibraciones de los sistemas elásticos que ayudarán a entender la parte práctica del presente trabajo.

El estudio dinámico de los sistemas se centra en los movimientos de los cuerpos y a las fuerzas asociadas a ellos. En su totalidad, todos los cuerpos que poseen una masa y elasticidad determinadas son capaces de vibrar. Una vibración mecánica puede describirse como la variación a lo largo del tiempo de un sistema en torno a una posición de equilibrio estable. Su característica fundamental es su periodicidad, siendo lo más habitual el movimiento armónico simple.

A partir de la definición mencionada podemos definir el *periodo de vibración* como el intervalo de tiempo necesario para que el sistema efectúe un ciclo completo, el número de ciclos por unidad de tiempo como *frecuencia* y *amplitud de vibración* como el valor máximo de desplazamiento realizado por el cuerpo desde su posición estable.

Existen dos tipos de vibraciones: libres y forzadas. Un sistema elástico tiene una vibración libre cuando se le somete a un impulso inicial y el movimiento generado se mantiene solamente por las fuerzas restauradoras inherentes al sistema. Dicho sistema vibrará en uno o varios modos de vibración (frecuencias naturales, " ω_n ") dependientes de la distribución de su masa y rigidez.

En cambio, cuando al sistema se le aplican fuerzas externas cíclicas da lugar a una vibración forzada. Si la excitación generada es oscilatoria, el sistema llegará a vibrar a la frecuencia de dicha excitación. Si esta frecuencia coincide con una de las frecuencias naturales del sistema, éste entrará en resonancia. Al entrar en resonancia, se produce una amplificación de la oscilación la cual puede llegar a ser mortal según la estructura y su aplicación (puentes, edificios...).

CONCEPTOS

El presente trabajo trata del análisis de las vibraciones libres en sistemas con un grado de libertad. Por tanto, se van a introducir algunos conceptos importantes a los que se hará referencia en la presentación de los resultados.

Como se presenta en la Fig.27, un sistema discreto básico de un grado de libertad se define por los siguientes parámetros:

- Masa indeformable, m
- Resorte sin masa de constante, k
- Amortiguador con constante, c

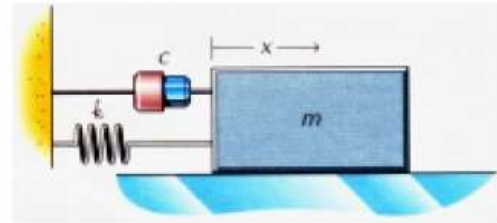


Fig. 28 Esquema sistema discreto 1 gdl

A la hora de resolver un problema real, la constante k se refiere a la rigidez del sistema. Para un caso básico como el que se presenta en la Fig.27, el sistema queda perfectamente definido mediante la coordenada x . Para que el sistema sea lineal los parámetros presentados deben ser constantes y no depender de la variable x . Si se le aplica al sistema una fuerza $f(t)$ en la dirección positiva del sistema, la ecuación del movimiento queda de esta manera:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$

Como conceptos importantes a conocer de cara al trabajo, se presentan los siguientes:

- **Frecuencia natural.** Para nuestro caso, es la frecuencia del movimiento armónico que resulta al introducir un desplazamiento al sistema en estado de equilibrio y dejarlo vibrar libremente sin amortiguamiento. Su valor es:

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

En sistemas con N grados de libertad, cada modo natural de vibración tendrá una frecuencia natural. Estas frecuencias sólo dependen de la rigidez y la masa del sistema, no dependiendo del tiempo ni de las condiciones iniciales.

- **Coefficiente de amortiguamiento.** También denominado amortiguamiento relativo, es el valor que refleja el tipo de amortiguamiento presente en el sistema y, según su valor, nos da una idea del grado de amortiguamiento del sistema para disipar la excitación externa. Se representa por la letra ξ .
- **Frecuencia natural amortiguada.** Se trata de la frecuencia del movimiento armónico que resulta al introducir un desplazamiento a un sistema amortiguado, en posición de equilibrio, y dejarlo vibrar. Su valor es:

$$w_d = w_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

No es la frecuencia natural del sistema, pero si el valor del coeficiente de amortiguamiento es pequeño serán muy parecidas.

VIBRACIONES LIBRES

En un caso de vibraciones libres no existe una perturbación externa continua en el tiempo. Suelen ser excitaciones tipo impulso, escalón o rampa las que generan dichas vibraciones en un periodo de tiempo muy corto. Por tanto, consideramos que la fuerza externa sobre el sistema es nula, $f(t)=0$. Si a esto le sumamos unas condiciones iniciales distintas de la trivial nula, $x_0=x(t_0)$, $\dot{x}_0=\dot{x}(t_0)$, se buscan soluciones en la forma: $x(t)=C \cdot e^{st}$.

Si derivamos esta última expresión y sustituimos cada componente en la ecuación del movimiento, resulta:

$$C(ms^2 + cs + k)e^{st} = 0$$

La expresión $x(t)=C \cdot e^{st}$ representa una solución para todos aquellos valores de "s" que cumplen con la ecuación anterior. Estos valores son las raíces de la ecuación característica $ms^2+cs+k=0$:

$$s = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (1)$$

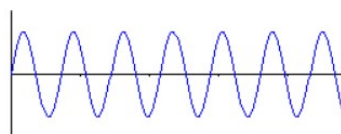
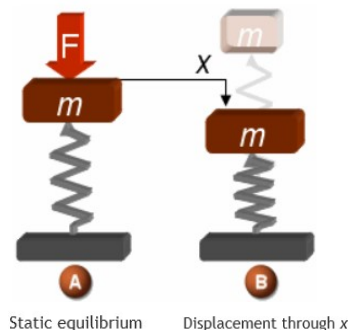
VIBRACIONES LIBRES NO AMORTIGUADAS

Para el caso de vibraciones libres no amortiguadas el valor del amortiguamiento es nulo. Por tanto nos queda la expresión anterior de la siguiente manera:

$$s = \pm \sqrt{-\frac{k}{m}}$$

Como k/m es una constante positiva, podemos definir $w^2 = k/m$ y obtenemos la siguiente expresión en forma de número complejo:

$$s = \pm \sqrt{-w^2} = \pm wi$$



Plot of the system displacement as a function of time

En tal caso, la solución general de la ecuación diferencial del movimiento tendrá la siguiente expresión:

$$x(t) = C_1 \cdot e^{i\omega t} + C_2 \cdot e^{-i\omega t}$$

siendo C_1 y C_2 constantes reales o complejos.

Teniendo en cuenta la relación de Euler ($e^{\pm i\omega t} = \cos\omega t \pm i\sin\omega t$):

$$x(t) = A \cdot \cos\omega t + B \cdot \sin\omega t$$

y asignando a las constantes obtenidas $A=X \cdot \cos\alpha$, $B=X \cdot \sin\alpha$, nos queda una ecuación de la forma:

$$x(t) = X \cdot \cos(\omega t - \alpha)$$

La solución de las vibraciones libres no amortiguadas es una función armónica de frecuencia $\omega = \sqrt{k/m}$. Por tanto, siendo una función armónica constante, el sistema vibrará en la misma frecuencia y es por ello que a esta frecuencia se la denomina **frecuencia natural** o propia del sistema.

VIBRACIONES LIBRES AMORTIGUADAS

Retomamos la Ecuación (1) y, en este apartado, el amortiguamiento **no es nulo**. Ello nos deja con que las dos raíces resultantes pueden ser reales o complejas, dependiendo del signo que tome la raíz \pm . El caso más extremo que se nos presenta es cuando el valor de la raíz es cero. Por tanto, nos quedaría la siguiente expresión:

$$0 = \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}$$

Despejando el valor del amortiguamiento, obtenemos que $\bar{c} = 2m\omega$. A este valor se le denomina **coeficiente de amortiguamiento crítico** y se traduce físicamente como la menor cantidad de amortiguamiento para que el sistema no oscile. Esto es muy importante porque, según las aplicaciones, nos puede interesar un amortiguamiento con un valor igual o cercano al crítico para evitar vibraciones y lograr que el sistema llegue al equilibrio lo más rápido posible (p.e, automoción).

Además, se define la **relación de amortiguamiento** ξ como el cociente entre el amortiguamiento c y el crítico \bar{c} .

$$\xi = \frac{c}{2m\omega}$$

Aplicando esta última fórmula en la Ecuación (1), obtenemos:

$$s = -\xi\omega \pm \sqrt{\xi^2\omega^2 - \omega^2} = \omega(-\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1})$$

A partir de esta última fórmula, se presentan tres posibles casos en función del valor que tome la relación de amortiguamiento:

- A) Si $\xi > 1$, las dos raíces que se obtienen son reales y distintas. Se denomina “*amortiguamiento supercrítico*”.
- B) Si $\xi = 1$, se obtiene una raíz doble de valor $s=-w$. Se denomina “*amortiguamiento crítico*”.
- C) Por último, si $\xi < 1$, las dos raíces resultantes son complejos conjugados y a este caso se le nombra como “*amortiguamiento subcrítico*”.

Para el caso A), la ecuación diferencial del movimiento no es armónica. El sistema no oscila, únicamente vuelve a la posición de equilibrio y cuanto mayor sea el valor del amortiguamiento, más tiempo tarda en alcanzar el equilibrio.

Para el caso B), la ecuación presenta una expresión parecida al caso A). No es armónica y la respuesta del sistema se amortigua. Al tratarse de un valor crítico, el sistema vuelve a su posición de equilibrio con la mayor brevedad posible sin oscilar.

Para finalizar, el caso C) presenta un resultado diferente al resto. Tenemos una expresión de este tipo:

$$s = -w\xi \pm iw\sqrt{1 - \xi^2}$$

Y se define la **frecuencia natural amortiguada** como $w_d = w\sqrt{1 - \xi^2}$.

Por tanto, la expresión de la ecuación diferencial del movimiento queda de la siguiente forma:

$$x(t) = e^{-\xi w t} X \cdot \cos(w_d t - \alpha)$$

Esta solución es aproximadamente armónica de frecuencia w_d y con amplitud que tiende **exponencialmente** a cero.

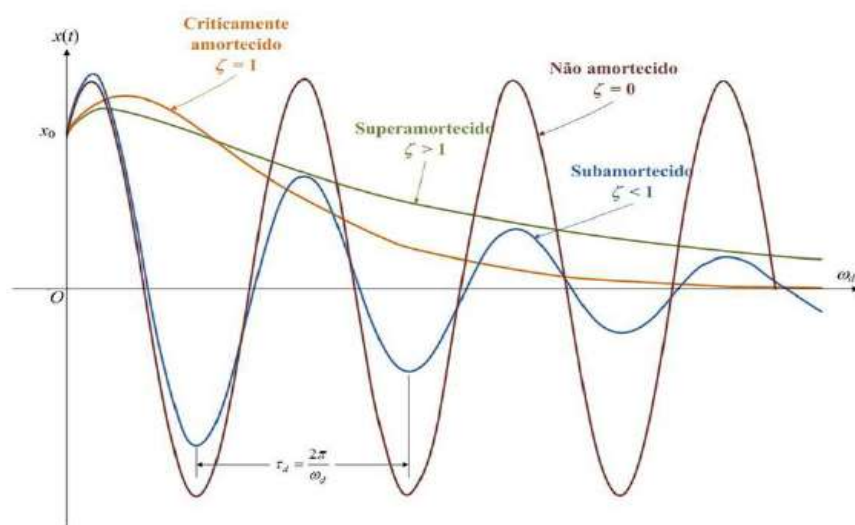
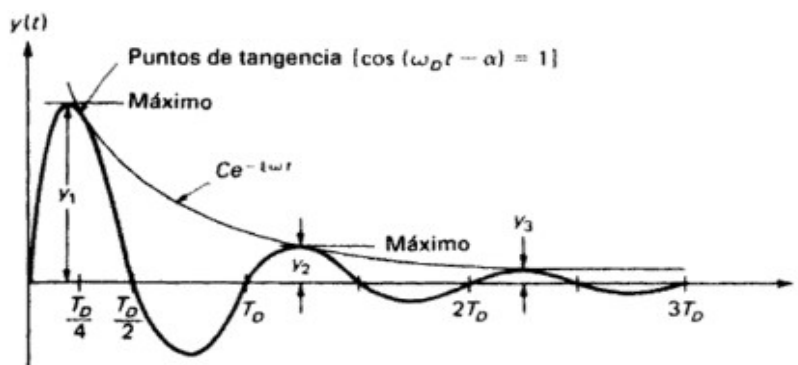


Fig. 29 Representación gráfica de los diferentes amortiguamientos

MÉTODO DEL DECREMENTO LOGARÍTMICO

Una vez analizados los principales conceptos que afectan a nuestro trabajo, voy a proceder a explicar el método empleado para calcular la relación de amortiguamiento de un sistema elástico amortiguado de un grado de libertad.

Consiste en iniciar una vibración libre (p.e, con una excitación tipo impulso), obtener una representación gráfica del movimiento del sistema y medir la proporción en que decrece la amplitud del movimiento. Generalmente, dicha proporción se define por el *decremento logarítmico* δ como el logaritmo natural del cociente de dos amplitudes máximas consecutivas en vibración libre.

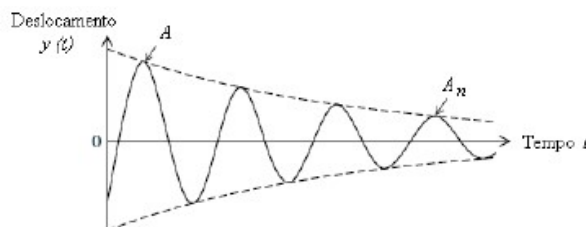


$$\delta = \ln \frac{y_1}{y_2}$$

Fig. 30 Esquema gráfico del método del decremento logarítmico

Se puede apreciar que cuando el coseno de la ecuación (...) toma el valor unitario, el desplazamiento cae sobre puntos de la curva exponencial. Estos puntos no coinciden exactamente con los máximos del movimiento oscilatorio. En la mayoría de los casos el error cometido es muy pequeño y, por tanto, se pueden considerar coincidentes con los puntos de máxima amplitud inmediatamente cercanos.

Cuando la relación de amortiguamiento es pequeña, el sistema vuelve a su posición de equilibrio "lentamente". Es decir, se suceden numerosos desplazamientos que van reduciendo su valor en una proporción reducida. En estos casos, se puede obtener el valor del decremento logarítmico con la siguiente expresión:



$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \ln \frac{y_1}{y_n}$$

$n = \text{número de ciclos.}$

Fig. 31 Representación gráfica de un sistema con relación de amortiguamiento mínima

Desarrollando la ecuación (...) con ayuda de la ecuación diferencial del movimiento, obtenemos la expresión que necesitamos de la relación de amortiguamiento:

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}}$$

TRABAJO REALIZADO

Este trabajo se centra en caracterizar dinámicamente diferentes muestras de paneles sandwich, con diferentes núcleos, fibras y configuraciones. Una vez fabricadas todas las muestras, se procederá a ensayarlas en vibración libre para obtener el valor de amortiguamiento relativo, el cual nos permite conocer qué combinación de componentes es la que más o menos energía disipa en el tiempo. Dicho trabajo se descompone en las siguientes partes:

- Fabricación de las probetas de laminados
- Fabricación de paneles sandwich
- Ensayo dinámico
- Resultados y análisis
- Soluciones
- Conclusiones

Cabe destacar que todas las probetas han sido fabricadas por nosotros de forma artesanal, empleando los medios disponibles en la nave de la empresa *Boreas NT*. Para ello, se han respetado una serie de normas internacionales que afectan a las dimensiones de las muestras, de manera que podamos obtener unos resultados válidos dentro del marco científico en el que nos encontramos.

Una vez finalizados los análisis pertinentes en este trabajo y de haber investigado todos los fenómenos presentes, tenemos la intención de redactar una serie de artículos científicos para su posterior publicación debido a que no existe un gran número de publicaciones que traten este tema en profundidad.

FABRICACIÓN DE PROBETAS DE LAMINADOS

Al inicio de este trabajo nuestra primera inquietud es estimar experimentalmente las propiedades mecánicas de unos laminados de vidrio y carbono con unas configuraciones concretas.

Me voy a centrar en explicar el proceso de fabricación de estas probetas de laminado y dejo de lado los resultados mecánicos que se obtienen debido a que no es el objetivo de este trabajo. Estas probetas se emplearán más adelante para el ensayo dinámico.

Para elaborar las probetas, empleamos los siguientes materiales:

- Fibra de carbono biaxial 0/90, gramaje: 300g/m²
- Fibra de carbono biaxial ±45, gramaje: 500g/m²
- Fibra de vidrio biaxial 0/90, gramaje: 800g/m²

La fibra de carbono empleada es de la marca Zoltek Panex 35 y la fibra de vidrio Hexcel HiMax FGE101 (se adjuntan los datos técnicos en el ANEXO I).

- Resina epoxi *Sicomín SR8500*
- Endurecedor lento *Sicomín SD8601*
- Endurecedor rápido *Sicomín SD8605*



Fig. 32 Soporte con los tejidos disponibles de fibra de carbono

Para realizar la mezcla de resina epoxi con endurecedor tomamos por cada 100 gramos de epoxi, 35 gramos de endurecedor. De estos 35 gramos, un 80% es endurecedor lento y el 20% restante es endurecedor rápido. Combinamos estos dos tipos de endurecedor para poder jugar con el tiempo de curado y obtener mejores propiedades de la matriz.

La elaboración de la resina se realiza un tiempo antes de su aplicación. Esto se debe a que hay que templarla a una cierta temperatura para que su viscosidad sea la adecuada y podamos repartirla más cómodamente durante el proceso.

Las probetas que se fabricaron constan de las siguientes configuraciones:

- Fibra de vidrio [0/45/0]
- Fibra de carbono [0/45/0] y [45/0/45]

Para las dimensiones de las probetas, tomamos de referencia la norma ASTM D 3039: "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials". Se opta por realizar un único laminado de cada configuración de dimensiones 300x300mm para, posteriormente, con una fresadora CNC, cortar las probetas.

El procedimiento realizado para la fabricación de las planchas de laminado ha sido la siguiente:

1. Limpieza de la chapa base y pisos. Corte de los tejidos.

Los pisos son placas, generalmente de aluminio, que se emplean para compactar el composite durante el curado y, así, obtener una superficie final lisa y mejorar el desalojo de la resina excedente. En nuestro caso, empleamos un piso por cada laminado a fabricar y con unas dimensiones muy similares a la superficie de laminado deseada y un espesor entre 4-5mm.



Fig. 33 Chapa empleada en la fabricación de laminados

La limpieza de la chapa base y los pisos es muy importante debido a que cualquier suciedad o partícula presente durante el curado puede generar imperfecciones en las piezas finales y generar una pérdida de propiedades finales. Dicha limpieza se inicia empapando un paño con alcohol y realizar sucesivas pasadas por la superficie hasta que no se aprecie suciedad u óxido.

Seguidamente, se aplican entre 3-5 capas de desmoldeante con el objetivo de facilitar la retirada de las probetas al finalizar el curado ya que la resina curada dificulta mucho la retirada del material empleado en el proceso.

A la par, se realiza el corte de los tejidos en las dimensiones deseadas con ayuda de una tijera automática.

2. Apilado de las capas del laminado.

Ya con todo el material preparado, nos disponemos a realizar el apilado de cada capa. Previamente, le damos una capa de resina a la base donde vamos a colocar la primera capa para fijarla en su zona. A partir de ahí, el proceso es repetitivo: impregnamos bien la fibra y colocamos la siguiente capa hasta finalizar.



Fig. 34 Apilado de las capas

3. Montaje y aplicación de la bolsa de vacío.

Finalizado el trabajo con la fibra y la resina, nos disponemos a colocar cada uno de los componentes que integran el método semiautomático de la bolsa de vacío. Como novedad a la Fig.19, tenemos que introducir los pisos en el proceso y éstos no se pueden colocar en cualquier parte. El orden es el que se indica en la Fig.34.

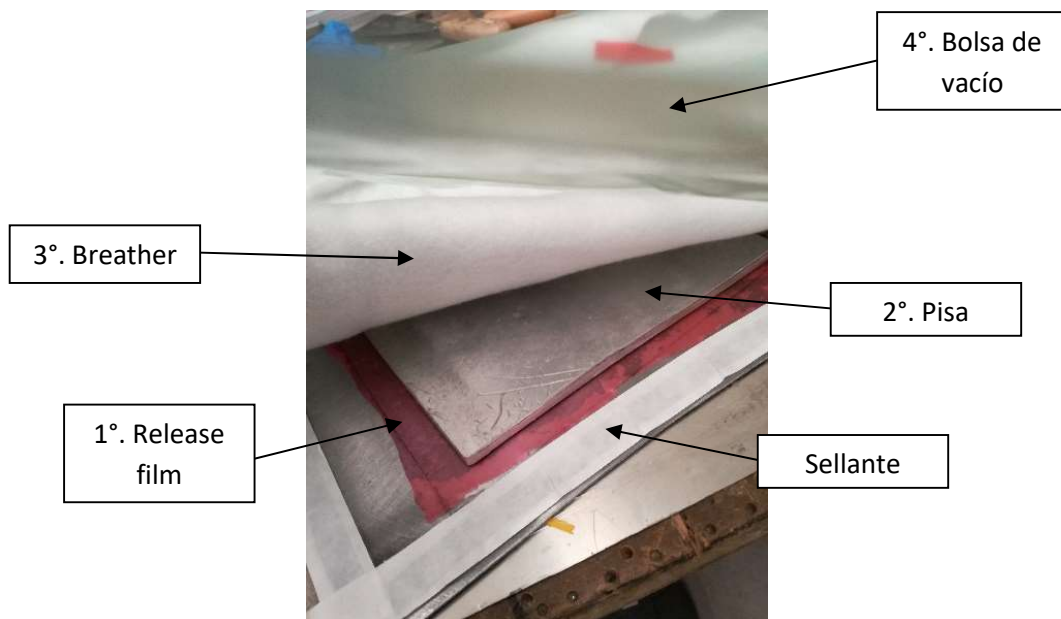


Fig. 35 Montaje para la bolsa de vacío

Para sellar la bolsa de vacío en el contorno de la base empleamos un sellante exterior para conseguir un cierre lo más hermético posible y, así, evitar que se escape el vacío. Hemos tenido cuidado de que los cantos de la chapa no estuviesen muy vivos para evitar el pinchazo de la bolsa.



Fig. 36 Aplicando vacío al conjunto

Para terminar, colocamos la toma de vacío en una zona donde no tengamos material compuesto para evitar que las planchas queden marcadas por la succión. Además, hay que tener cuidado con la toma porque puede absorber resina por error. Para solucionarlo, se coloca un trozo de bastante espesor de *breather* para que se quede retenida. Colocada la toma, enchufamos el tubo que conecta con la bomba e iniciamos el vacío. Como se aprecia en la Fig.XX, logramos un valor de -0,95bar.



Fig. 37 Valor de vacío obtenido



Fig. 38 Temperatura de la manta

4. Aislamiento y aplicación de calor.

Por último, necesitamos aplicar calor de alguna manera para activar el curado de las piezas y aislar el conjunto para que dicho calor no se pierda. Como en esta elaboración no empleamos autoclave, decidimos usar una manta calefactora como se ve en la Fig.XX. Fijamos la temperatura en 80°C y colocamos lana de roca debajo y alrededor de la mayor parte del conjunto (Fig.XX).



Fig. 39 Aislamiento inferior del conjunto y colocación de la manta



Fig. 40 Aislamientos laterales en el conjunto

El vacío lo retiramos aproximadamente tras 12 horas de curado y apagamos la manta calefactora 5 horas después de finalizar el vacío. En la Fig.40 se presenta la plancha de fibra de carbono ya curada.

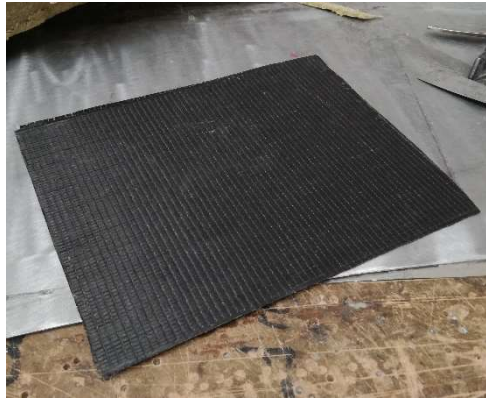


Fig. 41 Plancha de fibra de carbono obtenida

5. Corte de las planchas.

Con las planchas ya curadas, nos disponemos a cortar las probetas de acuerdo a la norma ASTM D 3039. Las dimensiones recomendadas se muestran en la Fig.41.

ASTM D 3039/D 3039M – 00^{e1}

TABLE 2 Tensile Specimen Geometry Recommendations^A

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, °
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

Fig. 42 Extracto de las dimensiones recomendadas en la norma ASTM D 3039

Para realizar el corte de forma precisa, empleamos una fresadora por control numérico. Fijamos las planchas en un tablón liso y éste lo atornillamos a mesa de la fresadora. Ajustamos las coordenadas de la máquina para que nos corte a las dimensiones deseadas. Las siguientes imágenes ilustran perfectamente el proceso descrito.



Fig. 43 Montaje de las planchas en la fresadora



Fig.44 Detalle del ajuste en cotas de las planchas con la fresa

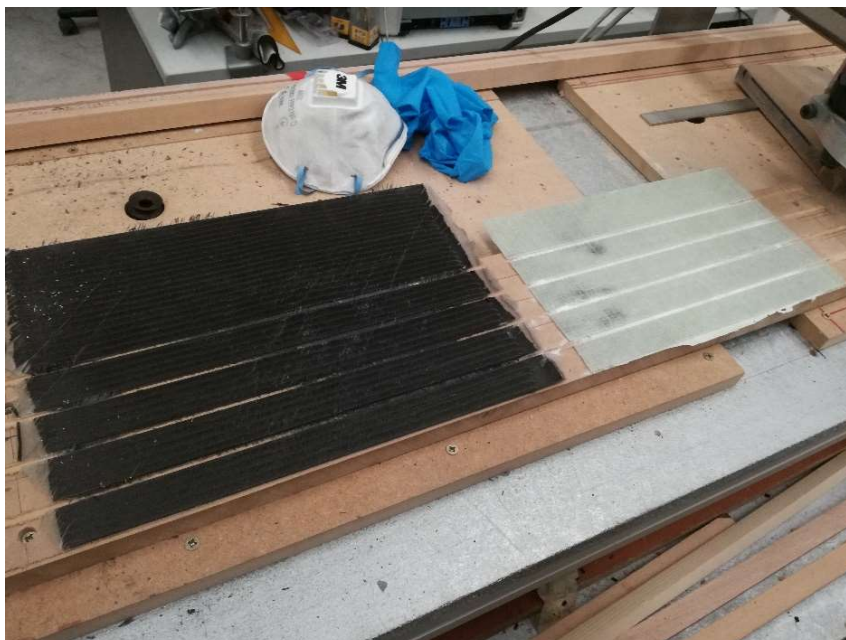


Fig. 45 Obtención de las probetas fresadas

FABRICACIÓN DE PANELES SANDWICH

La obtención de las probetas tipo sandwich es similar a la aplicada para las probetas de laminado excepto por la aplicación de varios elementos que se comentarán a lo largo del apartado. La norma de referencia empleada ha sido la ASTM C393: “Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure”, cuyas dimensiones recomendadas son 200 x 75mm y espesor el que mejor se considere en conjunto. Para los núcleos, se decide tomar un espesor de 9mm.

Aparte de emplear fibra de vidrio o carbono como capas, se emplean diferentes tipos de núcleo. Se ha tratado de emplear materiales muy diferentes (Fig.46, 47, 48) y son los siguientes:

- *Madera de abeto*

El abeto se clasifica, en función de su densidad aparente (0.32-0.6 kg/dm³), como una madera ligera y, en general, blanda.

Se emplearon listones de madera de diferentes dimensiones. Las medidas finales fueron de 200x72x9mm ya que esa medida en ancho era la más próxima que se podía obtener a la recomendada por la norma sin tener que fresar. Para finalizar, se unen los diferentes trozos de listones mediante cola blanca y se mantienen unidos con unos sargentos para asegurar una buena adhesión.

- *Corecell*

Se trata de una espuma estructural de PVC compacta muy empleada en aplicaciones eólicas, marítimas, aeronáuticas y de automoción debido a su resistencia al impacto y su alta resistencia a cortante. Existen muchos tipos de *corecell* y, de entre todos, se ha escogido el “Aircell HR 80” (la tabla de propiedades de este material se adjunta en el ANEXO I).

La obtención de estos núcleos fueron los más costosos. Primero, tuvimos que extraer un par de pedazos de un tamaño suficiente para nuestras probetas empleando una amoladora. A continuación, cortamos varias planchas empleando una cortadora de hilo de nicrom. Luego, fijamos las planchas en la mesa de fresado y realizamos una primera serie de pasadas para obtener una superficie lisa. Por último, apoyamos la cara lisa de cada plancha en la mesa para obtener unos núcleos lo más perfectos posibles y fresamos a las dimensiones definitivas.

- *Poliespan*

Por último, por curiosidad, se escoge el poliespan debido a su gran ligereza y su reducida resistencia a flexión. Partimos de una tapa de embalaje y lo que se hace es cortar una plancha plana con la ayuda de una multiherramienta. A continuación, se fija en la mesa de la fresadora y se procede, como en el caso del *corecell*, a fresar ambas caras hasta obtener el espesor deseado y, por último, se corta en ancho y longitud.



Fig. 46 Núcleos de madera



Fig. 47 Núcleos de corecell



Fig. 48 Núcleos de poliespan

Nuestra intención es obtener el mayor número de datos posible para poder promediar un valor lo más exacto posible y su error. Debido a la dificultad ya explicada de obtener algunos núcleos, se decide hacer el siguiente número de núcleos: 12 madera, 8 poliespan y 6 corecell.

Una vez con todos los núcleos terminados y las telas cortadas, procedemos a la limpieza de la base donde se realiza el apilado. Esta chapa es diferente a la empleada en la fabricación de probetas de laminado. Tiene mayor espesor para evitar cualquier deformación indeseable en el proceso y de unas dimensiones específicas para que, cuando toque realizar el curado, podamos introducirla en los raíles del autoclave.



Fig. 49 Material preparado para iniciar el apilado



Fig. 50 Planteamiento de colocación de las probetas

Se realiza el apilado de acuerdo a la siguiente configuración: [0/45/0/Núcleo/0/45/0]. El método empleado es similar a lo empleado en el caso de las probetas de laminado. Se va colocando cada tela en el orden indicado con su porción de resina perfectamente aplicada y distribuida en toda la superficie de la tela hasta su completa impregnación (Fig.51).



Fig. 51 Finalización del apilado de las probetas sandwich

Para este caso, se decide no emplear un pisa porque se considera que el acabado superficial de las muestras va a ser suficiente. Además, se modifica el cierre de la bolsa de vacío. Por lo general, se cierra contra la superficie base de las probetas y el vacío ejerce su presión contra las probetas. En su lugar, se realiza el cierre de la bolsa consigo misma (Fig.52) de manera que la presión se ejerce por ambos lados de la chapa.



Fig. 52 Proceso de cierre de la bolsa de vacío



Fig. 53 Detalle del cierre de la bolsa de vacío

Por último, fijamos unas cuantas galgas en la superficie de la bolsa para controlar la temperatura de curado. Introducimos todo el conjunto en el autoclave teniendo especial cuidado de no arrancar ninguna galga y dejamos que se curen las piezas.

La temperatura de curado se realiza con una rampa progresiva hasta los 70-80 grados. En cuanto a la presión, como estamos introduciendo el paquete sometido a vacío dentro de una cámara a una presión de 1bar, estamos incrementando en 1bar la presión total a la que están sometidas las muestras. Los tiempos de retirada del vacío y de aporte de temperatura son similares al caso de las probetas de laminado.



Fig. 54 Autoclave empleado en el proceso de curado

En la Fig.55 aparecen las muestras ya curadas, con el breather y la bolsa de vacío retiradas. El último paso para tener las probetas listas para ensayar es eliminar el exceso de resina curada que se haya podido quedar retenida en los laterales de cada muestra. Se emplea una lijadora para dicho objetivo (Fig.56).



Fig. 55 Muestras sandwich ya curadas



Fig. 56 Lijadora empleada para limpiar las muestras

En esta última imagen, Fig.57, se aprecia el nivel de acabado de una muestra con núcleo de madera y pieles de fibra de carbono.

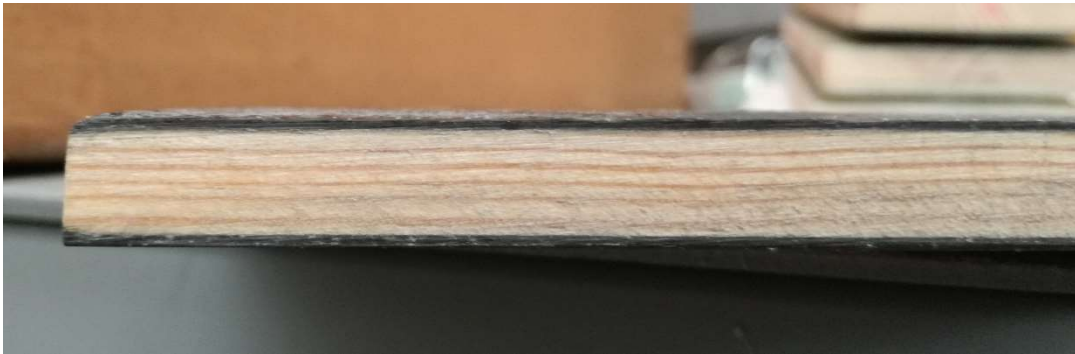


Fig. 57 Probeta sandwich lista para ensayar

ENSAYO DINÁMICO

Se procede al montaje de todos los dispositivos necesarios para ensayar la vibración libre de las muestras sandwich con el fin de obtener la relación de amortiguamiento.

Concretamente, se va a emplear un acelerómetro con un imán de neodimio unido al extremo libre de la muestra mediante una arandela adherida a la superficie y se va a aplicar un impulso manual de manera que se genere una pequeña flexión en la muestra. El extremo “empotrado” de la probeta se realiza con la ayuda de un perfil de aluminio y un par de sargentos de manera que la muestra queda perfectamente sujeta, sin posibilidad de movimiento.



Fig. 58 Sujeción realizada a cada muestra

Sólo se va a analizar a flexión en el plano YZ porque es el caso más directo y sencillo para ensayar y, por lo tanto, no se realiza ningún análisis ni en torsión ni en ningún otro plano. Esto es muy importante porque cabe tener en cuenta que cada modo de vibración de un sistema disipa la energía de forma diferente al resto de modos. Por tanto, se obtendrían otros valores si se sometieran las muestras a otro tipo de sollicitación.

En la Fig.59 se presenta el montaje realizado. Los dispositivos empleados fueron los siguientes:

- Ordenador portátil para registro de datos, programa "National Instruments"
- Acelerómetro PCB 352C33, de la empresa "PCB Piezotronics" (se incluye el certificado de calibración en el ANEXO I)
- Dispositivo adquisición de datos de la empresa "National Instruments"
 - o Adaptador de módulo WLS-9163
 - o Módulo NI WLS-9234
- Router Wifi/Ethernet para enlazar el dispositivo de adquisición de datos y el ordenador portátil



Fig. 59 Montaje de dispositivos para realizar el ensayo dinámico

Se ensaya cada una de las muestras fabricadas de la siguiente manera:

- Se fija la probeta en el borde de una mesa de acero con ayuda de un perfil de aluminio y un par de sargentos (Fig.59).
- Una vez bien sujeta la probeta, se coloca el acelerómetro con el imán en una arandela que se fija con un adhesivo a la superficie de la muestra. La arandela se fija en una posición coincidente con el plano de simetría de la muestra (Fig.58).
- Se espera a que la señal generada por el acelerómetro se estabilice aproximadamente en torno a cero y se efectúa un leve golpe en el extremo libre de la muestra para generar el impulso deseado.
- Se registran unos cuantos impulsos en diferentes puntos y se descargan en formato .xlsx para poder realizar su análisis.

A continuación, se presenta, por ejemplo, una de las respuestas generadas por una muestra de cada tipo de núcleo con laminados de carbono. Todas las respuestas analizadas de cada muestra se adjuntan en el ANEXO II:

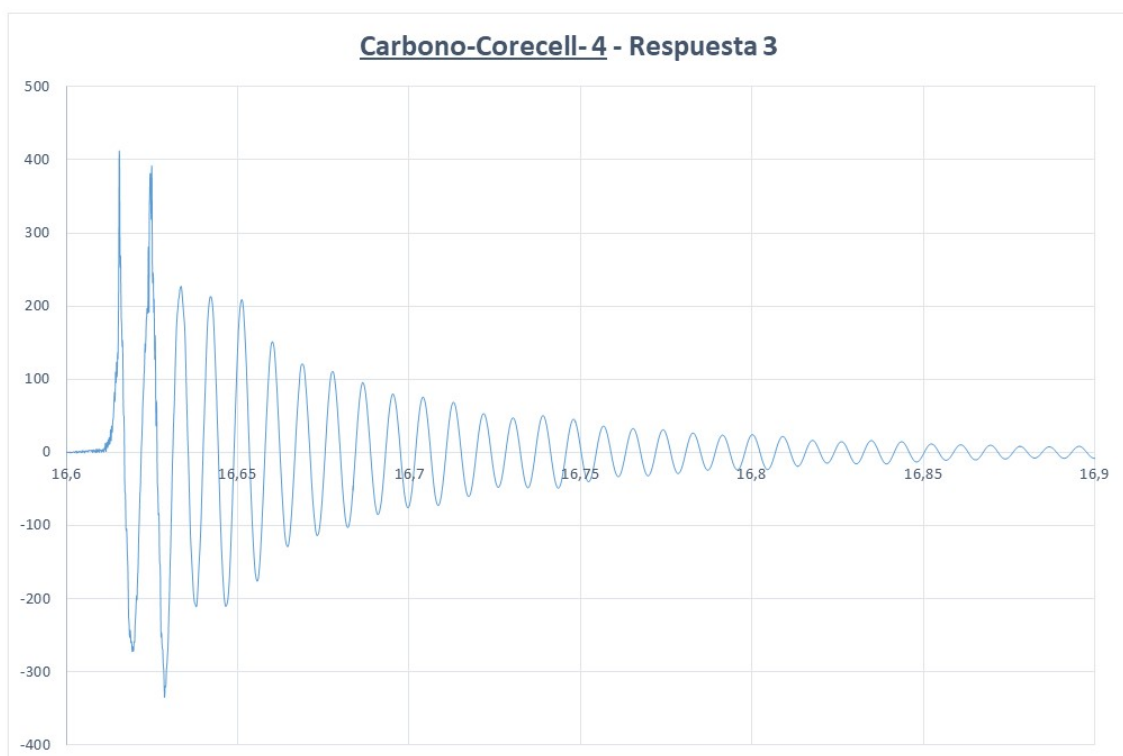


Fig. 60 Respuesta amortiguada de la muestra carbono-corecell 4

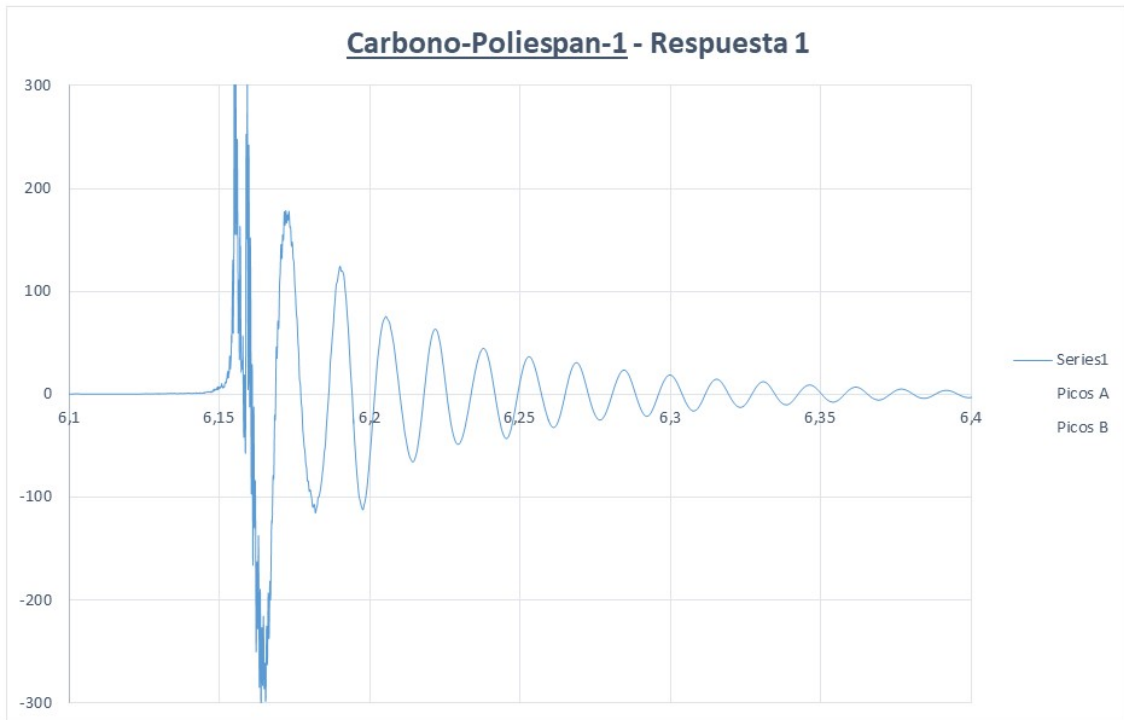


Fig. 61 Respuesta amortiguada de la muestra carbono-poliespan 1

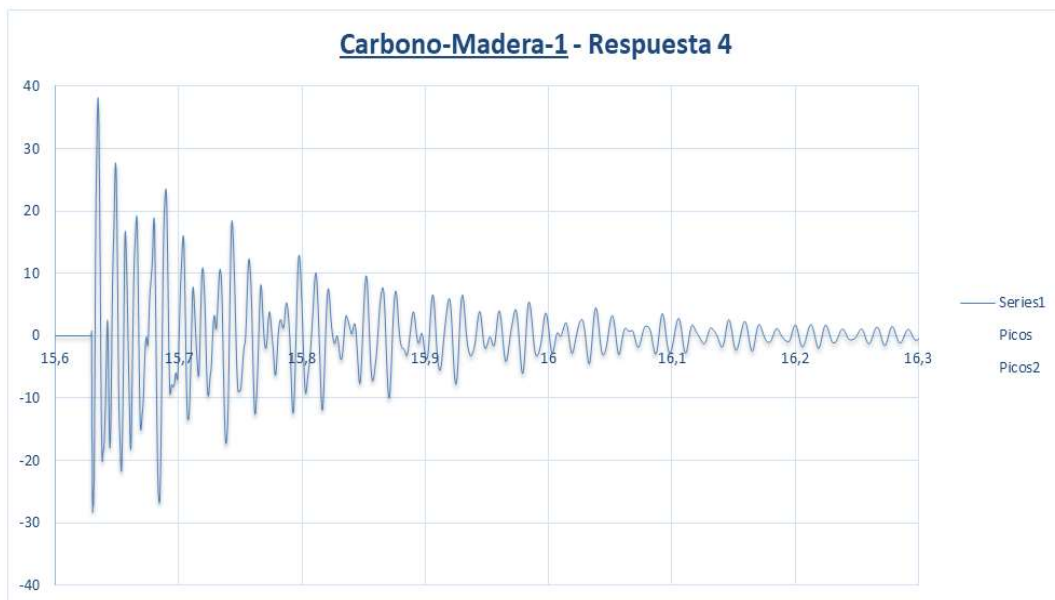
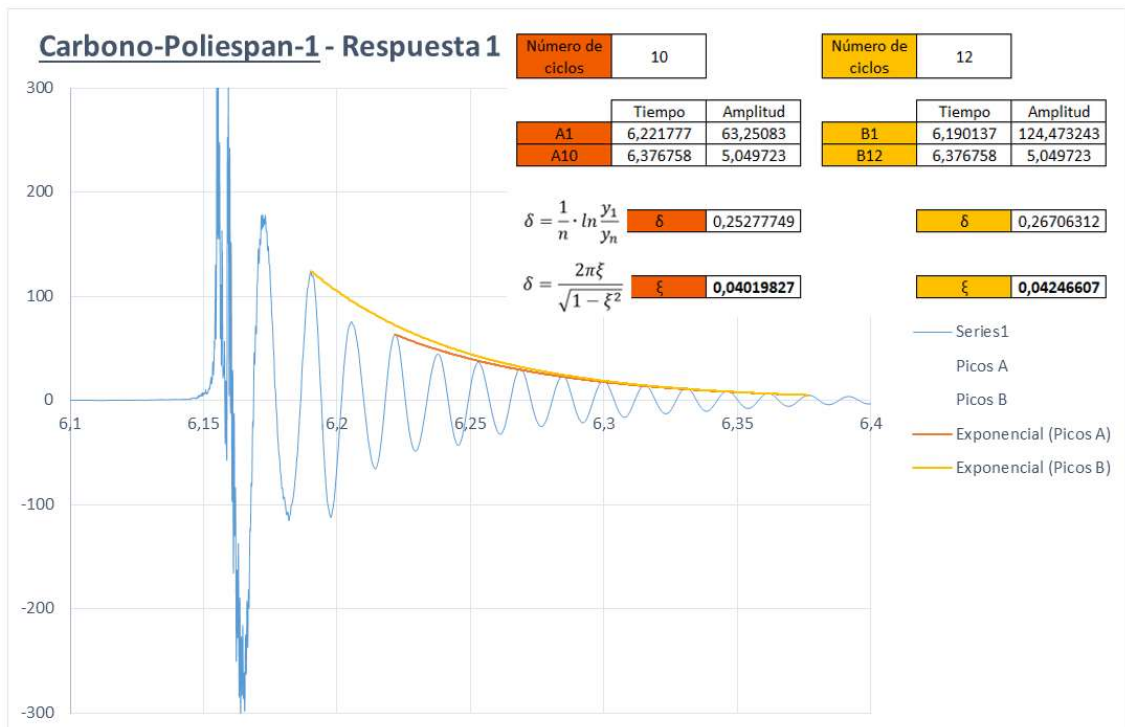
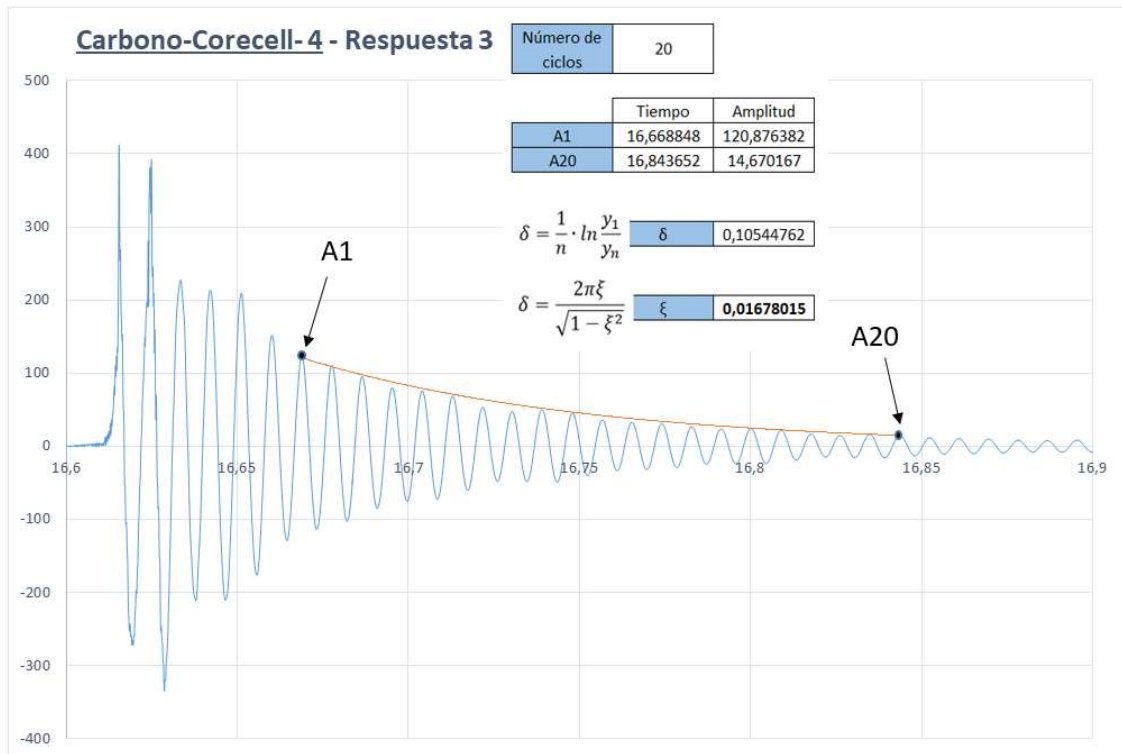


Fig. 62 Respuesta amortiguada de la muestra carbono-madera 1

Se procede a realizar el cálculo de la relación de amortiguamiento de cada caso presentado. A simple vista, las gráficas correspondientes al núcleo de corecell y poliespan presentan una forma de onda amortiguada bastante clara de acuerdo a lo que se menciona en la teoría de la vibración libre. En cambio, la forma de onda del núcleo de madera presenta un fenómeno que se analizará en el próximo apartado.

En general, se toma el primer y último pico máximo de la gráfica que permite definir la curva exponencial según el método del decremento logarítmico. Tomadas las coordenadas de dichos puntos, se procede al cálculo de parámetros:



En esta última imagen se aprecian dos ajustes logarítmicos con diferentes picos iniciales. Esto se debe a que no queda del todo claro cuál sería el pico inicial correcto debido a que es muy complicado que la respuesta amortiguada sea perfecta por imperfecciones del material, proceso de fabricación...etc. En tales casos, se toma como aceptable el valor de amortiguamiento relativo de acuerdo a la siguiente prioridad:

1. La curva exponencial que se ajuste mejor a la forma de onda amortiguada en función del número de ciclos.
2. Si ambas curvas se ajustan de forma similar, se toma un valor promedio.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez descrito todo el procedimiento realizado, se procede a citar y mostrar los resultados y efectos llamativos de los ensayos.

El primer fenómeno llamativo ya ha sido mencionado y se corresponde con la Fig.62. Se aprecia una superposición de señales con diferentes frecuencias que, unidas a la señal del sistema, se obtiene lo que aparece en la figura indicada. Dicho fenómeno se conoce como **modulación en amplitud (AM)**, la cual es una variación de la amplitud de onda de la señal resultante. También se tiene en cuenta la posible entrada de ruido y cabe destacar que, en mayor o menor medida, este fenómeno aparece en un gran número de muestras. En la Fig.63 se muestra un ejemplo de modulación tipo AM de una de las probetas.

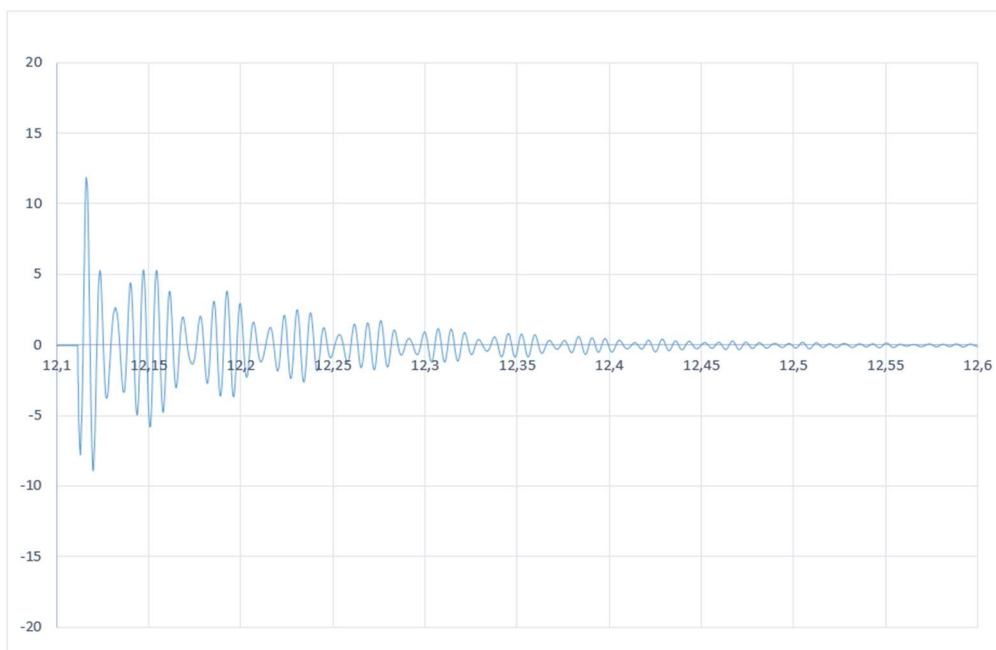


Fig. 63 Ejemplo de modulación

Para poder analizar este tipo de señales, se ha procedido a realizar un análisis en el dominio de la frecuencia con ayuda de lo que se conoce como **FFT (Fourier Fast Transform)**. Se trata de un algoritmo que, entre sus muchas aplicaciones, nos permite ejecutar un análisis en frecuencia de cualquier señal discreta. Como una modulación se trata de una adición de

señales armónicas en el sistema, es de interés conocer las frecuencias naturales presentes en cada muestra y, así, poder valorar cuántas señales se están introduciendo en la medición.

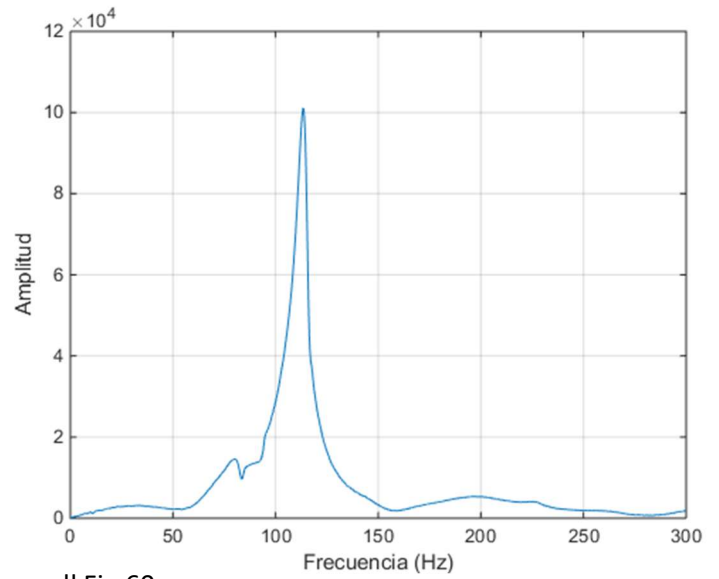
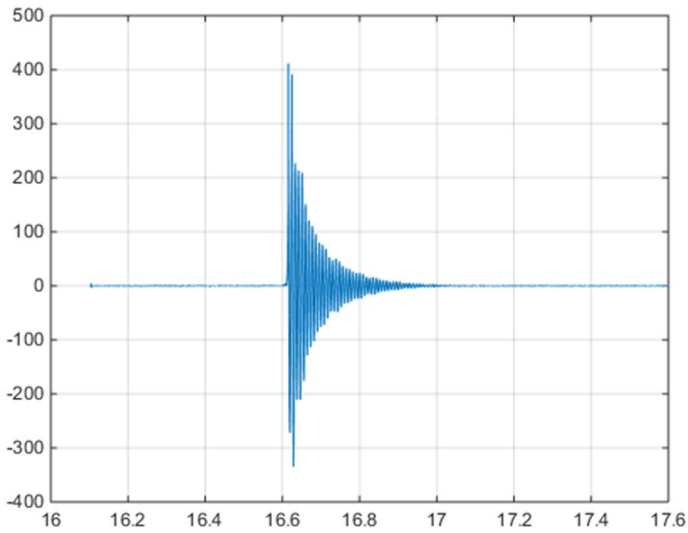
Para poder aplicar las FFT's a cada una de las muestras, se emplea el programa Matlab debido a su versatilidad y que es capaz de procesar muchos más datos que, por ejemplo, Excel. Se presenta la lista de comandos empleada en Matlab para dicho análisis:

```
t1=xlsread('CorecellCarbono3Resp1.xlsx','Hoja1','A1:A600000');
Z1=xlsread('CorecellCarbono3Resp1.xlsx','Hoja1','B1:B600000');
Fs=10200; %frecuencia de muestreo
%Poliespan y corecell, 10200Hz
%Madera y laminados, 12800Hz
nfft=524288; %número de datos tomados
Y1=fft(Z1,nfft);
Y1=Y1(1:nfft/2); %simetría en el espectro de la frecuencia
my1=abs(Y1);
f=(0:nfft/2-1)*Fs/nfft; %vector de frecuencias
figure(1);
subplot(1,1,1);
plot(t1,Z1);grid on
figure(2);
plot(f,my1);grid on
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Amplitud');
xlim([0,300]);
```

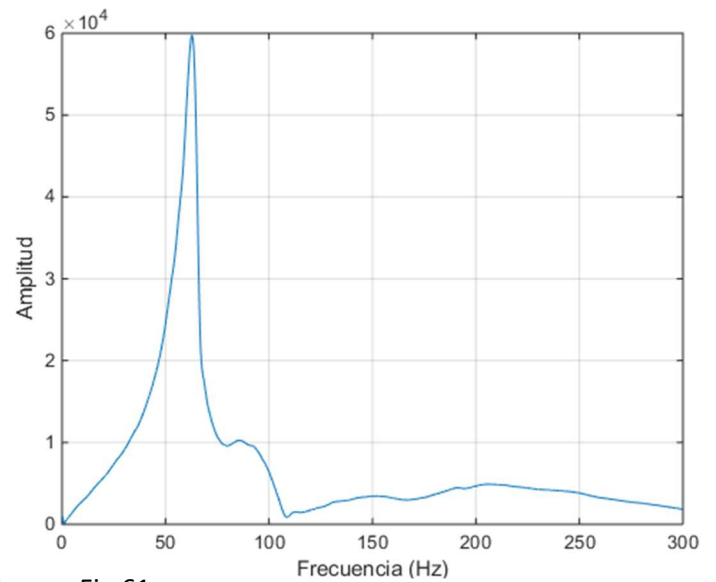
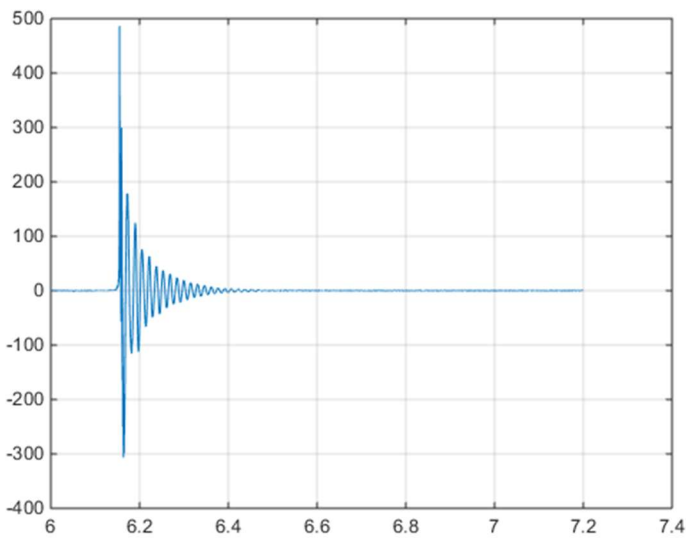
Se presentan los resultados obtenidos de las muestras correspondientes a los ejemplos presentados en las Fig.60, 61 y 62. Se aprecia notablemente el efecto de la modulación en el núcleo de madera y en mucho menor medida en los otros dos casos. Las frecuencias naturales presentes en cada muestra son las siguientes:

- Corecell: 113Hz
- Poliespan: 63Hz
- Madera: 73Hz, 90Hz, 126Hz

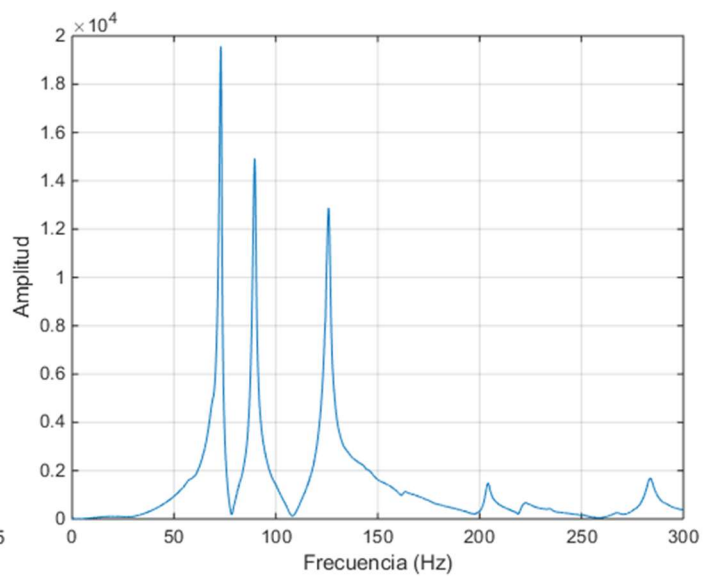
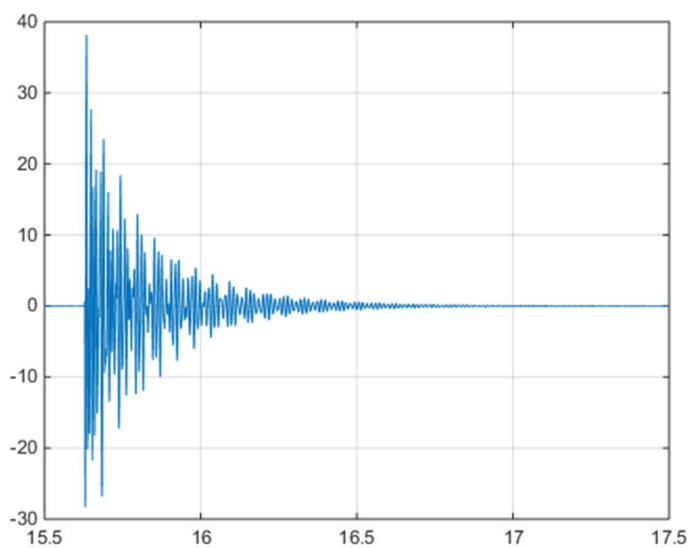
Se aprecia claramente que en los casos expuestos de los núcleos de corecell y poliespan apenas hay modulación mientras que en el caso de la madera nos encontramos con tres picos de diferentes señales.



Muestra corecell Fig.60



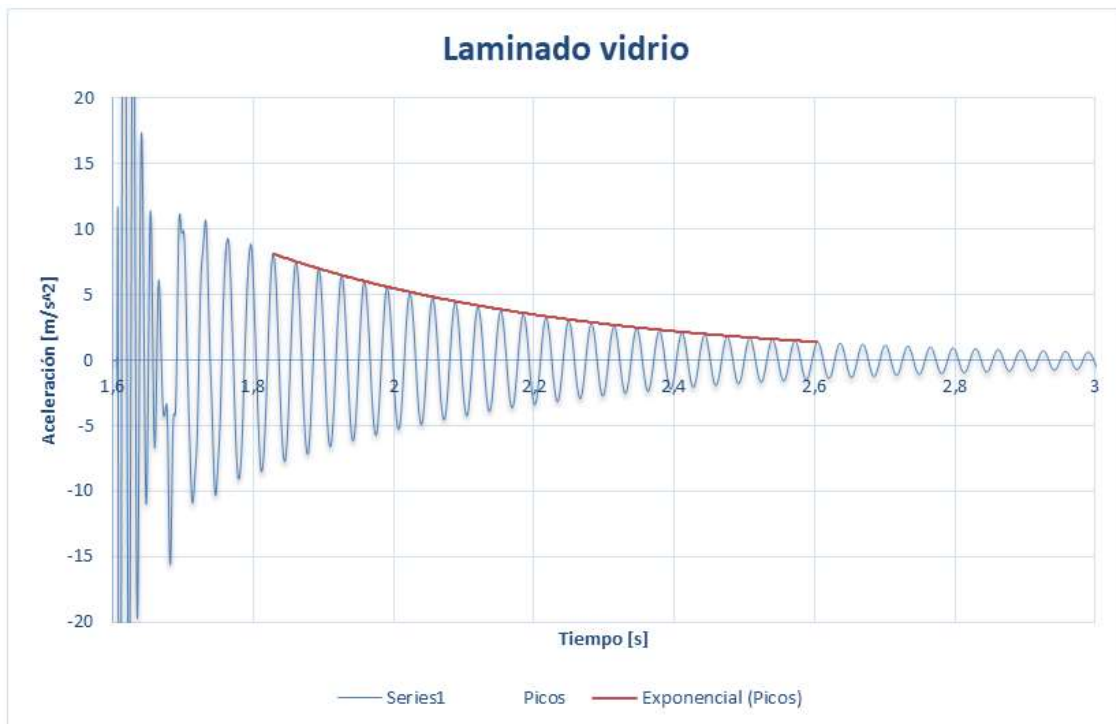
Muestra poliespan Fig.61



Muestra madera Fig.62

Llegados a este punto, se necesita hacer algo para comprobar si los comandos introducidos en Matlab realizan correctamente el análisis de frecuencia y, por ir descartando causas de la modulación, si las pieles de las muestras tienen algo que ver.

Para ello se realiza el ensayo dinámico a una probeta de laminado de vidrio y a otra de carbono. Si la respuesta amortiguada no presenta modulación, se puede descartar al laminado en sí como el causante y, además, si medimos la frecuencia entre picos de cada señal se puede verificar si la frecuencia resultante del análisis de Matlab es correcto.

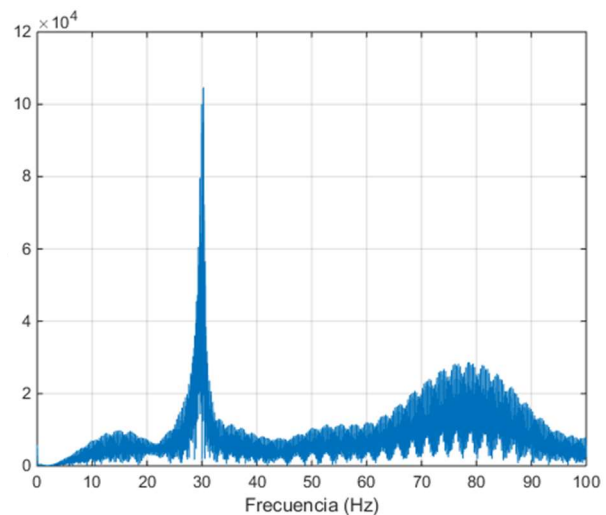


	Amplitud	Tiempo
A1	8,118484	1,827578
A20	1,389336	2,603516

δ	0,08826588
ξ	0,01404656

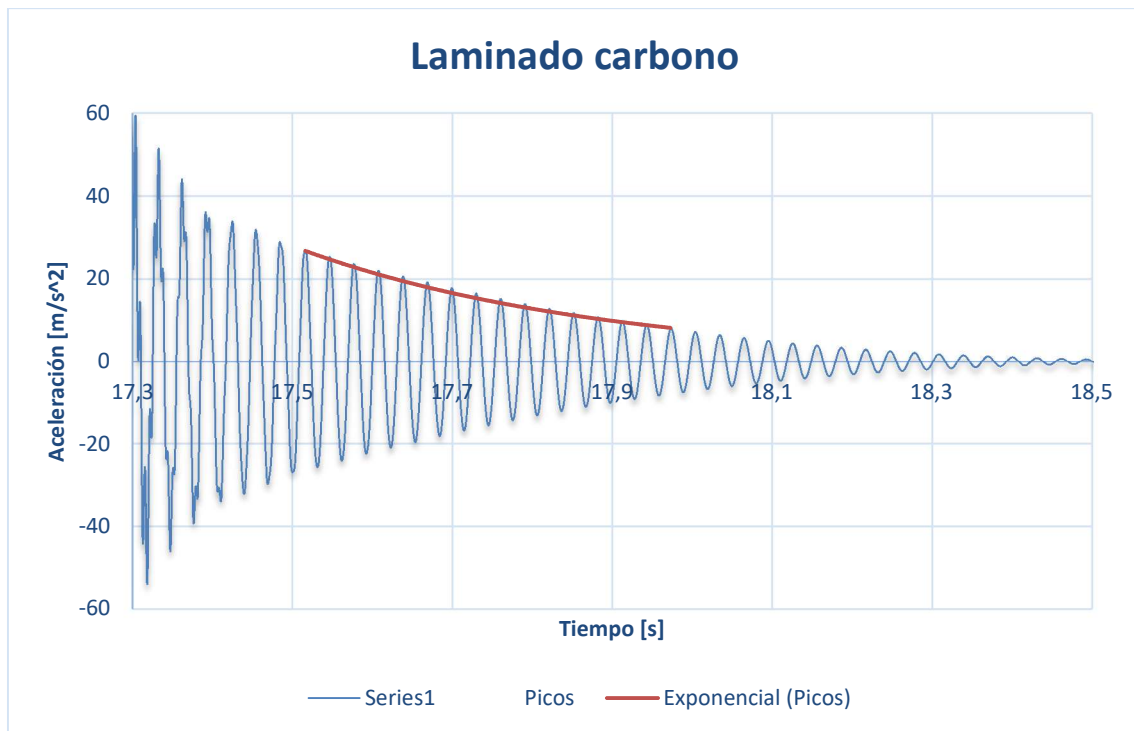
t1	1,827578
t2	1,859922

w_n	30,92	[Hz]
-------	-------	------



w_n obtenido en Matlab: 30Hz

Error cometido: 3%

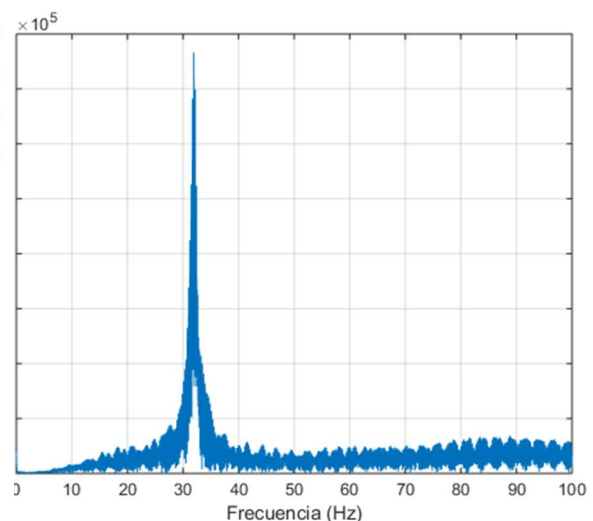


	Tiempo	Amplitud
A1	17,516172	26,735839
A15	17,973281	8,071203

δ	0,07984683
ξ	0,01270699

t1	17,699375
t2	17,729844

w_n	32,82	[Hz]
-------	-------	------



w_n obtenido en Matlab: 32Hz

Error cometido: 3%

Viendo los resultados, el error cometido al comparar las frecuencias naturales es muy poco y la frecuencia natural que aparece en la señal es única, sin presencia de modulación. Por tanto, se puede tomar por válido el análisis ejecutado por Matlab y que los laminados en sí han curado correctamente.

Se adjunta en el ANEXO I los valores de amortiguamiento relativo obtenidos de cada muestra con modulación. Obviamente, los valores que aparecen se han obtenido según nuestro criterio de ajuste en cada respuesta.

VALORES DE AMORTIGUAMIENTO RELATIVO PROMEDIO

	POREX - Carbono				POREX - Vidrio			
Promedio	0,039	0,050	0,028	0,024	0,020	0,024	0,036	0,041
Global	0,035				0,030			

	CORECELL - Carbono			CORECELL - Vidrio		
Promedio	0,026	0,028	0,017	0,033	0,028	0,014
Global	0,023			0,025		

	MADERA - Carbono					MADERA - Vidrio			
Promedio	0,011	0,022	0,015	0,015	0,013	0,013	0,017	0,01	0,017
Global	0,015					0,014			

SOLUCIONES

Cuando se finalizan los ensayos de todas las muestras y se analizan la mayor parte de las mismas, se empieza a divagar sobre el origen de la modulación presente. Las opciones que se nos ocurren son la unión entre el núcleo y el material compuesto o la sujeción donde se realizan los ensayos. Finalmente, nos inclinamos por la segunda opción.

Como se aprecia en la Fig.59 se sujeta el panel en una mesa de acero. Se considera que al tratarse de un ensayo tan sensible a cualquier señal independiente de la muestra, es posible que al generar el impulso en el extremo libre de la muestra se haga vibrar mínimamente la superficie de contacto e introducirse en la respuesta del sistema.

Por tanto, primero se decide cambiar de superficie. Se prueba sujetando una de las muestras que presentaban modulación en una base de madera y el resultado es negativo. A continuación, se opta por emplear caucho a modo de aislante como aparece en la Fig.64.

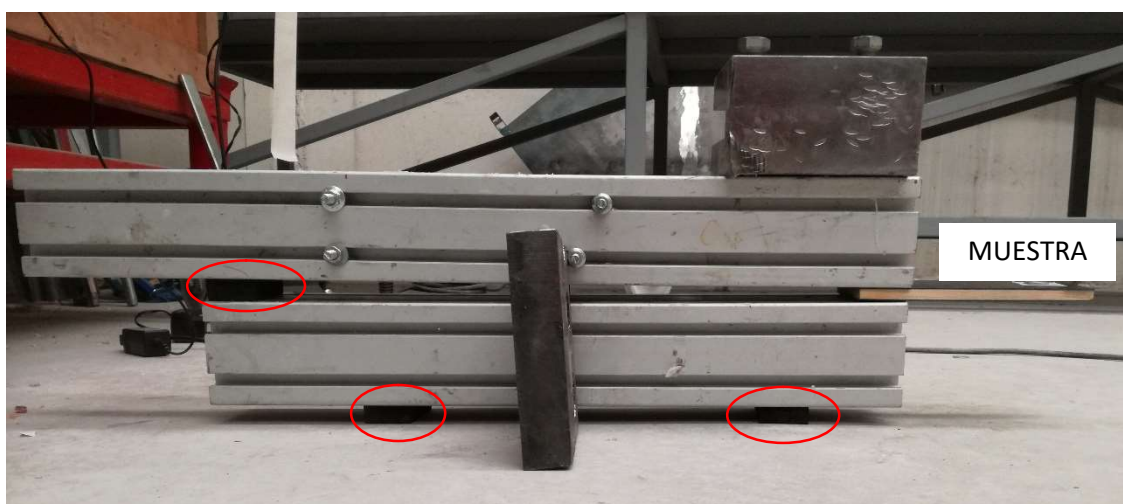


Fig. 64 Nuevo montaje empleando caucho (marcado en rojo)

Se emplean dos perfiles de aluminio para aprisionar la muestra y apoyamos el perfil inferior con dos trozos de caucho contra el suelo. Además, ponemos un tercer trozo de caucho entre perfiles para minimizar la transmisión de vibraciones entre ambos. Se registran los datos de este caso y se analizan calculando su relación de amortiguamiento y realizando el análisis de frecuencia por Matlab.

El amortiguamiento relativo que se obtiene es bastante superior (casi 5 veces superior) a lo que se ha presentado en el apartado anterior, lo cual es bastante interesante porque ello indica que el montaje de la sujeción y la superficie empleada es fundamental. La sensibilidad del sistema a ensayar con cualquier perturbación externa mínima en un ensayo dinámico es muy alta.

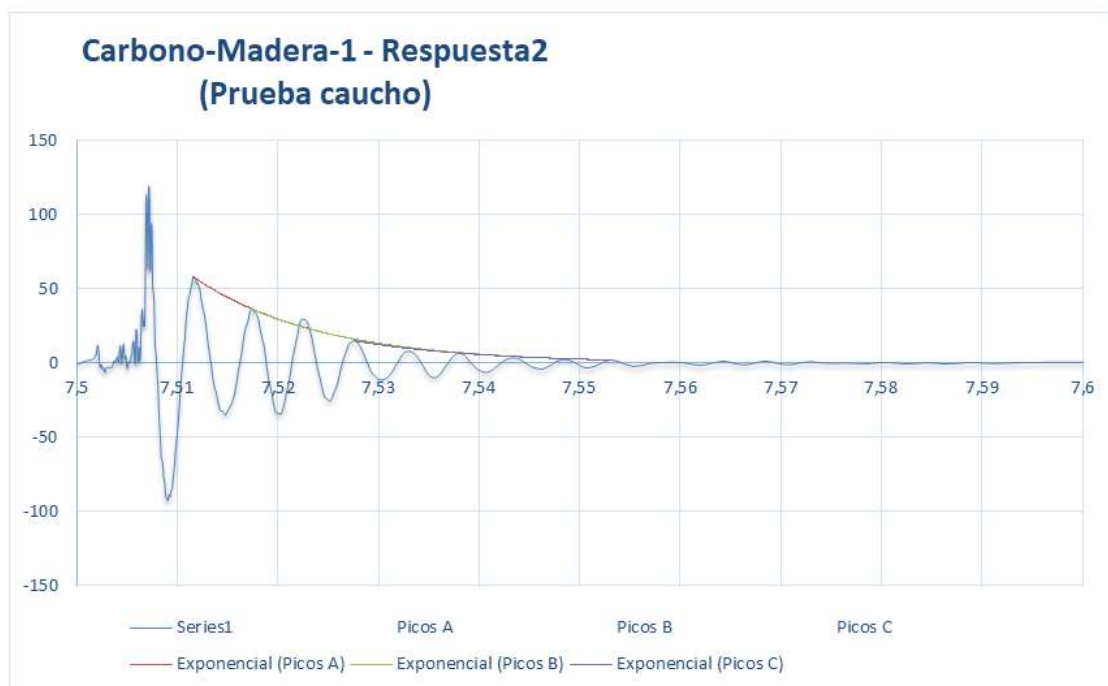
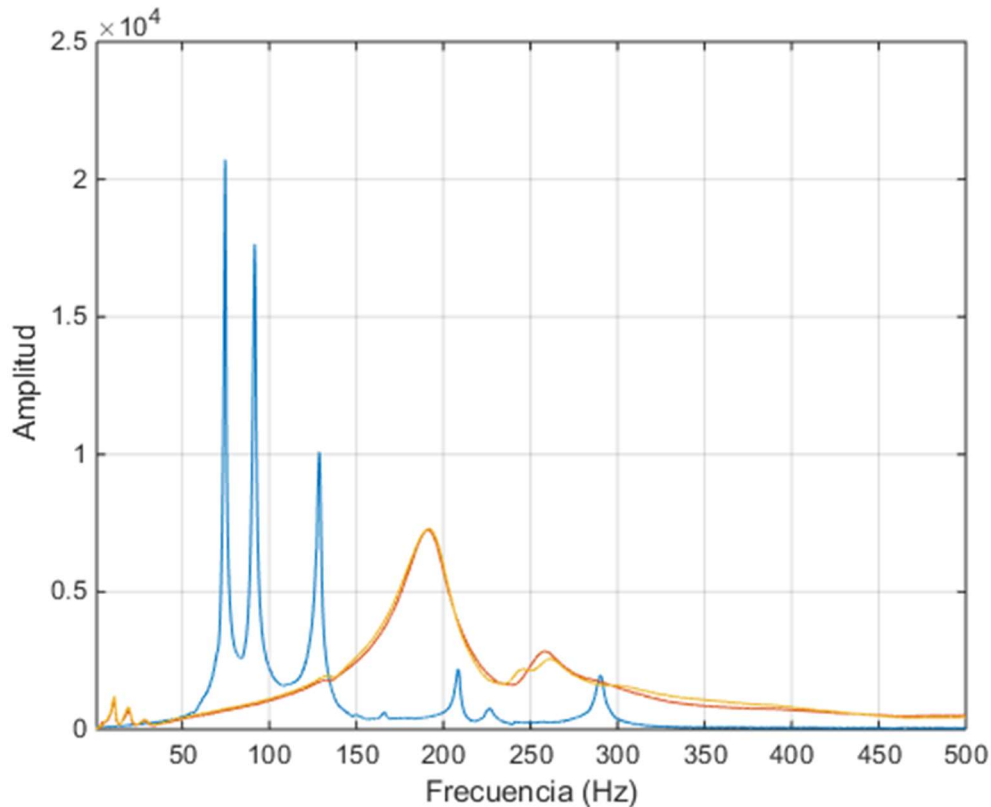


Fig. 65 Respuesta del sistema con la prueba del caucho

En la Fig.65 se presenta la respuesta del sistema con la prueba realizada. Se aprecia una respuesta mejor amortiguada y con menos modulación que en la Fig.62. También se adjunta una imagen del análisis de frecuencia, en el cual se aprecian las frecuencias presentes en la Fig.62 y algunas respuestas obtenidas en la prueba del caucho.

Madera-Carbono-1 (Prueba CAUCHO)

	Resp2	Resp3	Resp8	Resp12	Resp15
A	0,0655	0,0612	0,0756	0,0831	0,0666
B	0,0642	0,0653	0,0877	0,0800	0,0707
C	0,0620	0,0549	0,1000	0,0800	0,0735
Promedio	0,0639	0,0605	0,0878	0,0810	0,0703
Global	0,0727				



Se aprecia de forma muy clara que con esta prueba se mitiga gran parte de la modulación. La frecuencia recogida en esta última imagen es de 192Hz, la cual es mayor que la frecuencia analizada en la muestra de madera debido a que se ha rigidizado más la sujeción.

A partir de aquí, nuestro objetivo es mejorar la respuesta obtenida hasta dar con la mejor solución al problema de la modulación. Parece que todo apunta a que el principal problema proviene de la sujeción y trabajaremos para mejorar lo hasta ahora presentado. Es más, se van a redactar una serie de artículos sobre el trabajo realizado para publicarlo y poder añadir esta experiencia a un campo aún en expansión.

CONCLUSIONES

- De acuerdo a los ensayos con modulación realizados, el valor del amortiguamiento relativo de un panel sandwich depende en mayor medida de la rigidez del núcleo que de las pieles que lo componen.
Por tanto, el material seleccionado como núcleo determina en gran parte las características dinámicas del conjunto.

- A raíz de las últimas pruebas realizadas, la modulación distorsiona el valor del amortiguamiento relativo de manera muy notable (hasta cinco veces mayor).

- Según los resultados con modulación, cuanta mayor es la rigidez del núcleo, menor es su amortiguamiento relativo y, por tanto, menor su valor de amortiguamiento.
Esta conclusión es sólo orientativa debido a que la modulación afecta en gran medida el valor de amortiguamiento relativo que se obtiene.

- La superficie de sujeción influye de manera muy sustancial en la modulación introducida en la recogida de datos.

BIBLIOGRAFÍA

Apuntes de *Introducción a los materiales compuestos*, Dr. José Sancho Rodríguez

Apuntes de *Elementos de máquinas y vibraciones*, Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales

Dinámica estructural. Teoría y cálculo, Ed. Reverté, S.A. Mario Paz, Universidad de Louisville

<https://es.scribd.com/document/241256317/AP-T12-1-MPyC-tema12-DeformacionElasticaCompuestosFibraLarga-laminados>

<https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/11/02/introduccion-a-los-paneles-sandwich-i-definicion/>

<https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2010/01/27/introduccion-a-los-paneles-sandwich-ii-distribucion-de-cargas-y-tensiones-en-un-panel-sandwich-bajo-la-accion-de-presiones-superficiales/>

<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/496/544>

<http://www.navalcomposites.com/materiales-compuestos/>

<https://technicalfloor.com>

http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Velas_Aparejos/Cabulleria/Dyneema_Spectra.asp

http://ocw.uc3m.es/historico/elasticidad-y-resistencia-ii/material-de-clase-1/CAPITULO_7.pdf

<http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/fisica-aplicada-a-la-ingenieria/contenidos/tema-4/VIBRACIONESMECANICAS.pdf>

<http://www.atcp.com.br/imagens/produtos/sonelastic/artigos/ITC04-ATCP.pdf>

<https://es.slideshare.net/andreshernandezcorreo/notas-dinamica-estructural-open>

<http://www.construmatica.com/construpedia/Madera>

ANEXO I

Fichas técnicas de los compuestos empleados, mediciones y certificados

ÍNDICE

- Tabla de medidas realizadas a probetas de laminados
- Tabla de medidas realizadas a los núcleos
- Tabla de medidas realizadas a los paneles sandwich
- Tablas de valores de amortiguamiento relativo
- Certificado de calibración del acelerómetro PCB 352C33
- Comercial y datos técnicos de la fibra de carbono ZOLTEK PX35
- Comercial y datos técnicos de la fibra de vidrio HiMax FGE101
- Comercial y datos técnicos de la resina y endurecedores SR 8500, SD 8605, SD 8601
- Comercial y datos técnicos del núcleo de corecell Aircell HR 80

Medidas realizadas a las probetas de laminado

FIBRA DE VIDRIO	ANCHURAS					ESPEORES		
V0.1	25,25	25,40	25,37	25,45	25,55	2,00	2,05	2,10
V0.2	24,60	24,65	24,55	24,55	24,55	2,20	2,25	2,20
V0.3	25,75	25,65	25,75	25,70	25,60	2,20	2,25	2,20
V0.4	23,45	23,60	23,75	23,80	24,10	2,20	2,20	2,20
V0.5	26,00	25,65	25,60	25,85	25,60	2,20	2,20	2,20

ANCHO	minimo	ESPESOR	minimo	LARGO
25,40	25,25	2,05	2,00	226,80
24,58	24,55	2,22	2,20	226,70
25,69	25,60	2,22	2,20	226,70
23,74	23,45	2,20	2,20	226,60
25,74	25,60	2,20	2,20	226,70

FIBRA DE CARBONO	ANCHURAS					ESPEORES		
C0.1	24,65	24,70	24,55	24,60	24,65	1,70	1,80	1,70
C0.2	25,65	25,50	25,50	25,60	25,45	1,30	1,50	1,50
C0.3	24,80	25,00	24,70	24,80	25,00	1,40	1,80	1,60
C0.4	24,65	24,85	24,75	24,70	24,80	1,30	1,30	1,30
C0.5	25,35	25,35	25,50	25,55	25,65	1,60	1,80	1,60

ANCHO	minimo	ESPESOR	minimo	LARGO
24,63	24,55	1,73	1,70	299,90
25,54	25,45	1,43	1,30	299,80
24,86	24,70	1,60	1,40	299,60
24,75	24,65	1,30	1,30	299,30
25,48	25,35	1,67	1,60	299,50

FIBRA DE CARBONO	ANCHURAS					ESPEORES		
C45.1	24,65	24,55	24,65	24,55	24,55	1,90	2,35	1,90
C45.2	24,05	23,85	23,90	23,60	23,10	1,60	2,20	1,80
C45.3	24,75	24,90	24,65	24,90	24,70	1,70	2,40	1,90
C45.4	25,00	25,15	25,30	25,50	25,70	1,60	1,90	1,80
C45.5	25,70	25,80	25,45	25,40	25,65	1,80	2,10	1,90

ANCHO	minimo	ESPESOR	minimo	LARGO
24,59	24,55	2,05	1,90	299,70
23,70	23,10	1,87	1,60	300,00
24,78	24,65	2,00	1,70	299,30
25,33	25,00	1,77	1,60	299,40
25,60	25,40	1,93	1,80	300,30

Medidas realizadas a los núcleos

MADERA	L	w1	w2	w3	t1	t2	t3	Promedio "w"	Promedio "t"	
I	198	72,85	72,79	72,81	9,05	9,08	9,04	72,82	9,06	
II	198	72,98	72,80	72,68	9,04	9,12	8,92	72,82	9,03	
III	197	72,87	72,84	72,74	8,98	9,17	8,99	72,82	9,05	
IV	197	72,81	72,91	72,63	9,06	9,16	9,15	72,78	9,12	
V	198	71,25	72,75	72,83	9,03	9,09	9,13	72,28	9,08	
VI	197	72,70	72,98	71,63	9,01	9,01	9,09	72,44	9,04	
VII	198	72,67	72,88	72,76	8,97	8,90	9,04	72,77	8,97	
VIII	197	72,91	72,86	72,74	9,02	9,05	9,07	72,84	9,05	
IX	197	72,88	72,79	72,89	8,92	8,95	9,07	72,85	8,98	
X	198	72,86	72,77	72,91	9,17	9,09	9,03	72,85	9,10	
XI	197	72,77	72,76	72,89	9,23	9,40	9,18	72,81	9,27	
XII	197	72,77	72,84	72,87	8,98	9,00	8,93	72,83	8,97	
								72,74	9,06	<i>Promedio</i>
								0,18	0,08	<i>Desviación</i>

CORECELL								Promedio "w"	Promedio "t"	
I	199	73,66	73,84	74,34	9,08	8,91	8,85	73,95	8,95	
I	199	74,85	74,54	74,53	8,96	8,67	8,83	74,64	8,82	
III	199	70,09	69,79	70,50	8,78	8,82	8,86	70,13	8,82	
IV	200	74,66	73,80	72,49	7,07	6,84	6,36	73,65	6,76	
V	199	74,84	74,74	74,88	8,19	8,86	8,83	74,82	8,63	
VI	200	73,96	74,26	74,15	8,95	8,75	9,00	74,12	8,90	
								65,99	7,82	<i>Promedio</i>
								1,73	0,85	<i>Desviación</i>

POLISPAN								Promedio "w"	Promedio "t"	
I	199	74,06	74,02	74,22	8,53	8,56	8,35	74,10	8,48	
II	199	74,17	74,04	74,26	8,65	8,31	8,64	74,16	8,53	
III	198	74,35	74,25	74,16	8,78	8,52	8,57	74,25	8,62	
IV	199	74,33	74,34	74,70	8,42	8,37	8,52	74,46	8,44	
V	200	74,46	74,30	74,22	8,56	8,31	8,23	74,33	8,37	
VI	199	74,59	74,33	74,43	8,40	8,21	8,41	74,45	8,34	
VII	199	74,50	74,24	74,31	8,45	8,50	8,78	74,35	8,58	
VIII	199	74,53	74,67	74,75	8,88	8,57	8,71	74,65	8,72	
								66,25	7,68	<i>Promedio</i>
								0,18	0,13	<i>Desviación</i>

Medidas realizadas a las muestras de sandwich

MADERA	L	w1	w2	w3	t1	t2	t3	Promedio "w"	Promedio "t"	
I	195	72,10	72,15	73,00	12,10	12,20	12,40	72,42	12,23	
II	194	72,10	72,00	72,50	14,90	14,45	14,20	72,20	14,52	
III	192	72,55	72,50	72,40	12,15	12,15	12,05	72,48	12,12	
IV	196	71,90	71,70	71,80	14,15	14,35	14,50	71,80	14,33	
V	195	69,60	71,15	71,50	12,15	12,40	12,25	70,75	12,27	
VI	195	71,00	71,40	71,60	14,50	14,30	14,65	71,33	14,48	
VII	197	72,30	72,60	72,85	11,10	11,10	11,00	72,58	11,07	
VIII	196	71,80	72,00	72,25	11,60	11,30	11,10	72,02	11,33	
IX	194	72,40	72,00	72,25	11,50	11,40	11,50	72,22	11,47	
X	197	72,60	72,50	72,65	13,35	13,75	13,70	72,58	13,60	
XI	195	71,75	71,50	71,45	13,70	13,70	13,50	71,57	13,63	
XII	200	72,80	72,35	72,45	13,60	13,90	13,40	72,53	13,63	
								72,04	12,89	<i>Promedio</i>
								0,58	1,28	<i>Desviación</i>

CORECELL								Promedio "w"	Promedio "t"	
I	198	73,45	74,40	74,60	14,10	14,20	14,00	74,15	14,10	
II	192	72,60	71,75	71,75	11,70	11,65	11,60	72,03	11,65	
III	198	64,00	64,60	65,70	11,10	11,10	11,10	64,77	11,10	
IV	200	71,50	71,00	73,20	8,90	9,30	9,25	71,90	9,15	
V	198	73,80	74,10	75,10	13,60	13,25	12,80	74,33	13,22	
VI	198	73,05	73,45	74,45	13,30	13,20	13,30	73,65	13,27	
								64,76	11,39	<i>Promedio</i>
								3,60	1,82	<i>Desviación</i>

POLISPAN								Promedio "w"	Promedio "t"	
I	193	67,95	66,75	67,40	11,40	11,00	11,00	67,37	11,13	
II	198	72,05	70,80	70,60	14,15	14,00	14,30	71,15	14,15	
III	184	72,00	71,80	71,85	13,70	13,75	13,70	71,88	13,72	
IV	190	69,95	69,00	69,70	10,75	10,70	11,00	69,55	10,82	
V	173	64,60	63,45	64,40	11,40	11,80	11,80	64,15	11,67	
VI	174	65,90	65,00	64,30	11,60	11,60	11,40	65,07	11,53	
VII	198	74,60	74,60	72,90	12,80	13,20	13,30	74,03	13,10	
VIII	198	76,20	75,10	75,00	13,05	13,15	13,20	75,43	13,13	
								62,70	11,25	<i>Promedio</i>
								4,07	1,27	<i>Desviación</i>

VALORES DE AMORTIGUAMIENTO RELATIVO

	POREX - Carbono				POREX - Vidrio			
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Resp1	0,041	0,053	0,020	0,025	0,018	0,023	-	-
Resp2	0,039	0,041	0,023	0,020	0,022	0,021	0,040	0,042
Resp3	0,038	0,054	0,032	0,026	0,023	0,024	0,040	0,041
Resp4	0,057	-	0,034	-	0,018	0,028	0,037	0,036
Resp5	-	0,051	0,029	-	0,039	-	0,027	0,043
Promedio	0,039	0,050	0,028	0,024	0,020	0,024	0,036	0,041
Global	0,035				0,030			

	CORECELL - Carbono			CORECELL - Vidrio		
	M2	M3	M4	M1	M5	M6
Resp1	0,026	0,027	0,017	0,031	0,028	0,017
Resp2	0,025	0,027	0,016	0,035	0,026	0,013
Resp3	0,025	0,029	0,017	0,033	0,028	0,013
Resp4	0,026	0,027	0,017	-	0,028	0,013
Resp5	-	-	-	0,033	-	0,014
Promedio	0,026	0,028	0,017	0,033	0,028	0,014
Global	0,023			0,025		

	MADERA - Carbono						MADERA - Vidrio					
	M1	M3	M5	M7	M8	M9	M2	M4	M6	M10	M11	M12
Resp1	0,013	-	0,025	0,016	0,019	0,012	0,016	0,019	-	-	-	0,020
Resp2	0,008	-	-	0,017	0,012	0,011	0,012	0,020	0,009	-	-	0,017
Resp3	0,010	-	0,018	0,013	0,008	0,016	-	0,012	-	-	-	0,015
Resp4	0,011	-	0,022	0,015	0,020	-	0,012	-	0,011	-	-	0,016
Resp5	-	-	0,023	0,013	-	-	0,010	0,015	-	-	-	-
Promedio	0,011	-	0,022	0,015	0,015	0,013	0,013	0,017	0,010	-	-	0,017
Global	0,015						0,014					

Certificado de calibración del acelerómetro

~ Calibration Certificate ~
Per ISO 16063-21

Model Number: 352C33
 Serial Number: 110724
 Description: ICP® Accelerometer Method: Back-to-Back Comparison (AT401-3)
 Manufacturer: PCB

Calibration Data

Sensitivity @ 100.0 Hz **103.1 mV/g** Output Bias 11.0 VDC
 (10.51 mV/m/s²) Transverse Sensitivity 2.1 %
 Discharge Time Constant 2.1 seconds Resonant Frequency 57.2 kHz

Sensitivity Plot

Temperature: 71 °F (22 °C) Relative Humidity: 40 %

Data Points

Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)
10.0	2.1	300.0	-1.1	7000.0	-1.6
15.0	1.5	500.0	-1.7	10000.0	1.1
30.0	0.9	1000.0	-2.3		
50.0	0.4	3000.0	-2.8		
REF. FREQ.	0.0	5000.0	-2.2		

Mounting Surface: Stainless Steel w/Silicone Grease Coating Fastener: Stud Mount Fixture Orientation: Vertical
 Acceleration Level (ms⁻²): 10.0 g (98.1 m/s²)
*The acceleration level may be limited by shaker displacement at low frequencies. If the listed level cannot be obtained, the calibration system uses the following formula to set the vibration amplitude: Acceleration Level (g) = 0.010 x (freq)².
 *The gravitational constant used for calculations by the calibration system is: 1 g = 9.80665 m/s²

Condition of Unit

As Found: n/a
 As Left: New Unit, In Tolerance

Notes

1. Calibration is NIST Traceable thru Project 822/277342 and PTB Traceable thru Project 1254.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI/NCSL Z540-1-1994 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows: 5-9 Hz; +/- 2.0%, 10-99 Hz; +/- 1.5%, 100-1999 Hz; +/- 1.0%, 2-10 kHz; +/- 2.5%.

Technician: Robert Zsebehazy *R.Z.* Date: 02/10/10

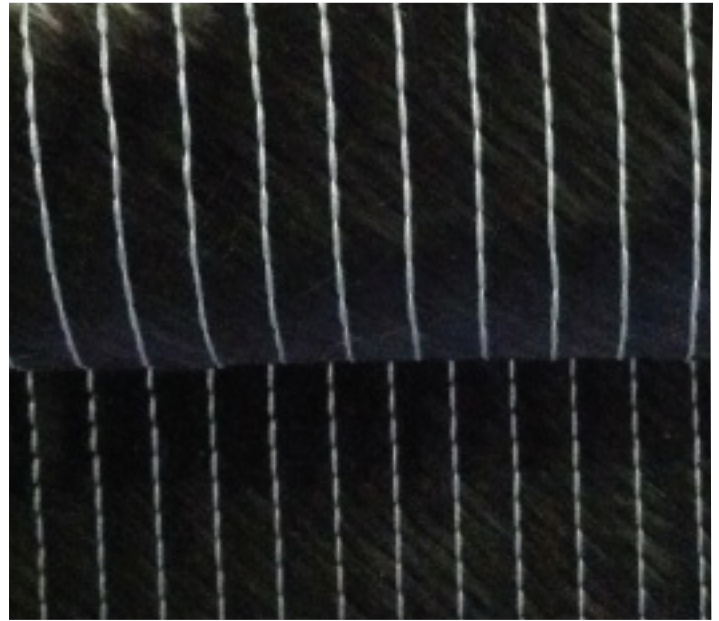
PCB PIEZOTRONICS™
VIBRATION DIVISION
 Headquarters: 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043
 Calibration Performed at: 10869 Highway 903, Halifax, NC 27839
 TEL: 888-684-0013 FAX: 716-685-3886 www.pcb.com

ACCREDITED CALIBRATION CERT #1862.02 PAGE 1 of 1 cal48 - 334870376.34

ZOLTEK™ PX35 MULTI-DIRECTIONAL FABRICS

DESCRIPTION

ZOLTEK PX35 Multi-Axial Fabric is produced from our ZOLTEK PX35 continuous carbon fiber tow. Unique fiber spreading techniques are utilized to obtain a wide range of MD fabric weights for a varied set of composite part applications. Quick composite part build-up is cost effectively achieved with our diverse weight range of low-cost carbon fiber products. Drapable fabric construction, ideal for complex shape preforms. Pillar and Tricot stitching patterns available.



APPLICATIONS

- Automotive
- Marine
- Aircraft
- Infrastructure

RECOMMENDED USE

- Body Panels (Interior/Exterior)
- Components/Undercarriage
- Reinforcement

+/- 45° FABRIC ARCHITECTURE				
Material	Fiber Orientation	Nominal Weights g/m ² (oz)		
		MD 300	MD 500	MD 600
ZOLTEK PX35 50K	+45°	150 (4.42)	250 (7.37)	300 (8.85)
ZOLTEK PX35 50K	-45°	150 (4.42)	250 (7.37)	300 (8.85)
Polyester Stitch	-	4 (.118)	7 (.206)	8 (.235)
Total	-	304 (8.9)	507 (14.9)	608 (17.9)

0/90° FABRIC ARCHITECTURE				
Material	Fiber Orientation	Nominal Weights g/m ² (oz)		
		MD 300	MD 500	MD 600
ZOLTEK PX35 50K	0°	150 (4.42)	250 (7.37)	300 (8.85)
ZOLTEK PX35 50K	90°	150 (4.42)	250 (7.37)	300 (8.85)
Polyester Stitch	-	4 (.118)	7 (.206)	8 (.235)
Total	-	304 (8.9)	507 (14.9)	608 (17.9)

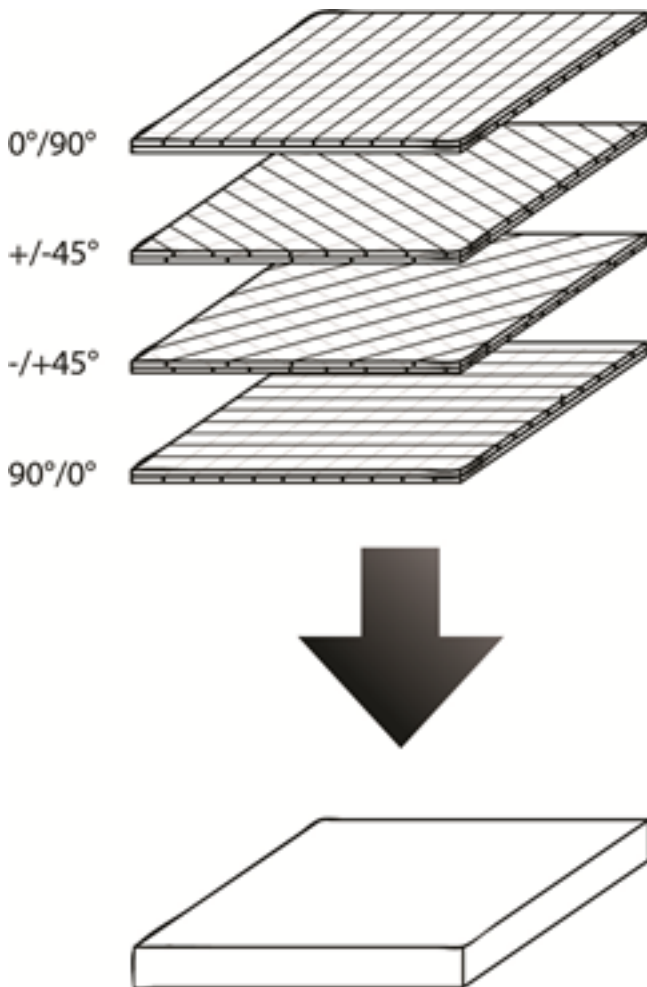
The properties listed in this datasheet do not constitute any warranty or guarantee of values. This information should only be used for the purposes of material selection. Please contact us for more details.



ZOLTEK™ PX35 MULTI-DIRECTIONAL FABRICS

MATERIAL FIBER PROPERTIES	SI	US
Tensile Strength	4,137 MPa	600 ksi
Tensile Modulus	242 GPa	35 msi
Electrical Conductivity	0.00155 ohm-cm	0.00061 ohm-in
Density	1.81 g/cc	0.065 lb/in ³
Fiber Diameter	7.2 microns	0.283
Carbon Content	95%	

The properties listed in this datasheet do not constitute any warranty or guarantee of values. This information should only be used for the purposes of material selection. Please contact us for more details.



TYPICAL PACKAGING

Wound on a cardboard cone, sealed in polyethylene bag, and placed in a cardboard box. Rolls stacked horizontally on pallets when shipping.

Standard Width: 1,270 mm +/- 20

Standard Roll Length: 50 m

+ Custom widths and roll lengths may be available upon request.

CERTIFICATION

ZOLTEK PX35 Fabrics are manufactured in accordance with ZOLTEK's written and published data. A Certificate of Conformance is provided with each shipment.

SAFETY

Obtain, read, and understand the Material Safety Data Sheet (SDS) before use of this or any other ZOLTEK product.



HiMax™ FGE101

[GE, 850, 0/90]



Product Data Sheet

Fabric Construction

Fibre Type: E-Glass
Construction: 0/90
Fabric Weight: 833 gsm +/- 5%

Stitching Fibre

Stitching Thread: Texturised Polyester
Stitch DTex: 78
Stitch Gauge: 6.0 gg
Stitch Length: 3.33 mm
Stitch Type: 1/2 Pillar Tricot
Stitch Weight: 6 gsm

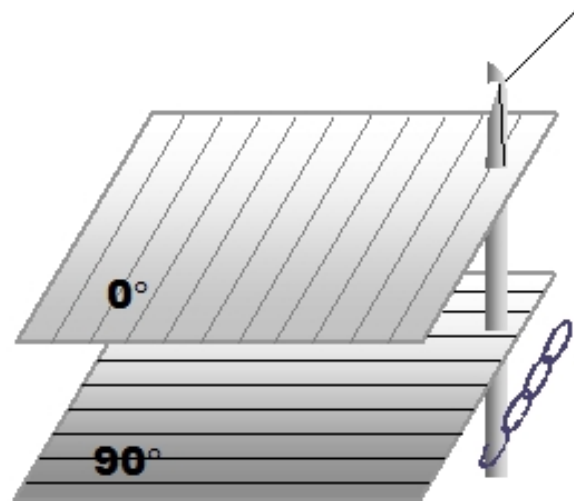
Ply Construction

0 Ply

Fibre Specification: E-Glass
Fibre Tex: 1200 tex
Gauge: 9 gg
Ply Weight: 425 gsm

90 Ply

Fibre Specification: E-Glass
Fibre Tex: 600 tex
Gauge: 17 gg
Ply Weight: 402 gsm



Customisation

Customer Code and Description:	Customer Specified
Fabric Width:	1270mm (+/- 5mm) - or tapes on application
Tracer Threads / Tapered Edges:	Customer Specified
Approved Fibres:	On Application
Roll Weight / Length:	Customer Specified
Cardboard Core:	Customer Specified
Packaging:	Customer Specified



HiMax™ FGE101

[GE, 850, 0/90]



Product Data Sheet

For more information

Hexcel is a worldwide supplier of composite materials to aerospace and industrial markets.

Our comprehensive range includes:

- HexTow® carbon fibres
- HexForce® reinforcements
- HiMax™ non-crimp fabrics
- HexPly® prepregs
- HexMC® moulding compounds
- HexFlow® RTM resins
- Redux® adhesives
- HexTool® tooling materials
- HexWeb® honeycombs
- Acousti-Cap® sound attenuating honeycomb
- Engineered core
- Engineered products

For quotes, orders and product information call +44 116 275 2200. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please go to:

<http://www.hexcel.com/contact/salesoffice>

SR 8500

Versatile epoxy system for composite applications

The **SR 8500 / SD 860x** system allows to manufacture a multiple kinds of composite parts that can work up to 70 °C continuously.

Solvent and reactive diluent free, without any aromatic or CMR amines.

Very simple handling : One resin and two hardeners mixable in any proportions to achieve the wanted reactivity.

Cure at ambient temperature and post cure at 40 to 60 °C

SD 8605

Fast hardener and **SD 8601** accelerator.

Reactivity adapted for the manufacturing of small parts.

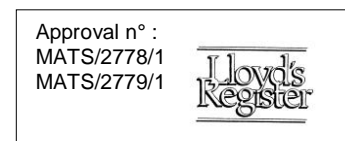
Good mechanical properties after ambient curing.

SD 8601

Ultra Slow Hardener.

Reactivity adapted for big part manufacturing

Should be post cured at 40 °C before un moulding



Application

- Hand laminating
- Injection
- Filament winding
- Cold or Hot press moulding
- Casting
- Adhesive

See page 5 for more details about the solutions given by **SR 8500**

Epoxy resin SR 8500

		SR 8500
Aspect		Liquid
Colour		Clear
Viscosity (mPa.s)	15 °C	24 500 ± 3 000
Rheometer	20 °C	9 800 ± 1 000
CP 50 mm	25 °C	4 500 ± 800
Shear rate 10 s ⁻¹	30 °C	2 300 ± 400
	40 °C	750 ± 200
Density :	20 °C	1.176 ± 0.05
Picnometer		
ISO 2811-1		
Storage stability:		24 months, crystallization free

Hardeners SD 860x

		SD 8605	SD 8604	SD 8603	SD 8602	SD 8601
Weight proportions SD 8601 SD 8605		0 100	25 75	50 50	75 25	100 0
Aspect / colour:		Yellow liquid				Clear liquid
Reactivity		Fast	Intermediate reactivity			Ultra slow
Viscosity (mPa.s)						
Rheometer	15 °C	630 ± 100	220 ± 40	100 ± 20	40 ± 10	20 ± 4
CP 50 mm	20 °C	400 ± 80	160 ± 30	75 ± 15	30 ± 5	15 ± 3
Shear rate 10 s ⁻¹	25 °C	280 ± 50	100 ± 20	50 ± 10	25 ± 5	12 ± 2
	30 °C	200 ± 40	80 ± 15	40 ± 10	20 ± 4	10 ± 2
	40 °C	100 ± 20	50 ± 10	25 ± 5	15 ± 3	7 ± 2
Density Picnometer ISO 2811-1	20 °C	1.02 ± 0.01	0.990 ± 0.01	0.980 ± 0.01	0.960 ± 0.01	0.950 ± 0.01

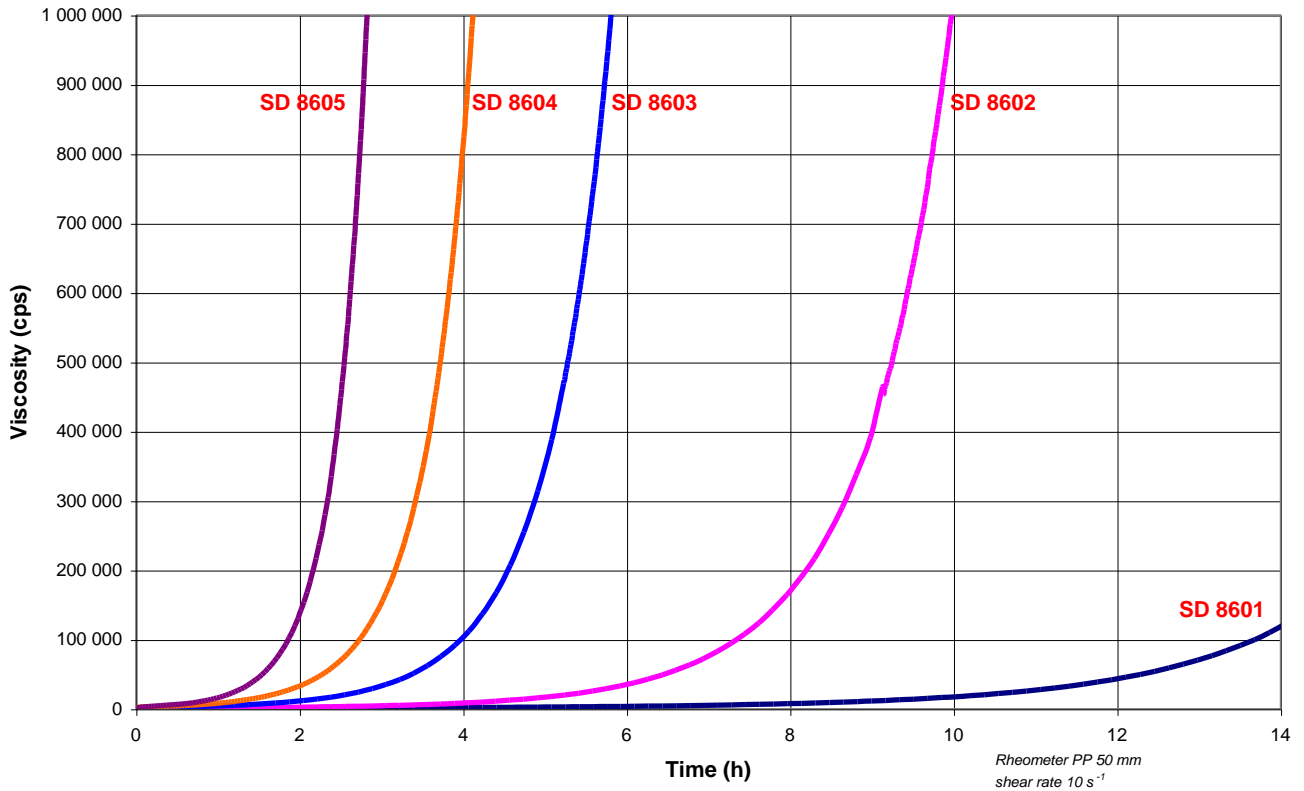
SR 8500 / SD 860x mix properties

		SR 8500 / SD 8605	SR 8500 / SD 8604	SR 8500 / SD 8603	SR 8500 / SD 8602	SR 8500 / SD 8601
Weight ratio		100 / 35	100 / 35	100 / 35	100 / 35	100 / 35
Volume ratio		100 / 40	100 / 40.9	100 / 41.7	100 / 42.5	100 / 43
Mix viscosity						
Rheometer	20 °C	2 800 ± 450	2 200 ± 400	1 750 ± 350	850 ± 100	750 ± 150
PP 50 mm	25 °C	2 000 ± 400	1 600 ± 300	900 ± 200	640 ± 30	400 ± 80
Shear rate 10 s ⁻¹	30 °C	1 000 ± 200	900 ± 200	700 ± 150	380 ± 70	250 ± 50
	40 °C	550 ± 100	400 ± 80	350 ± 70	300 ± 60	100 ± 20

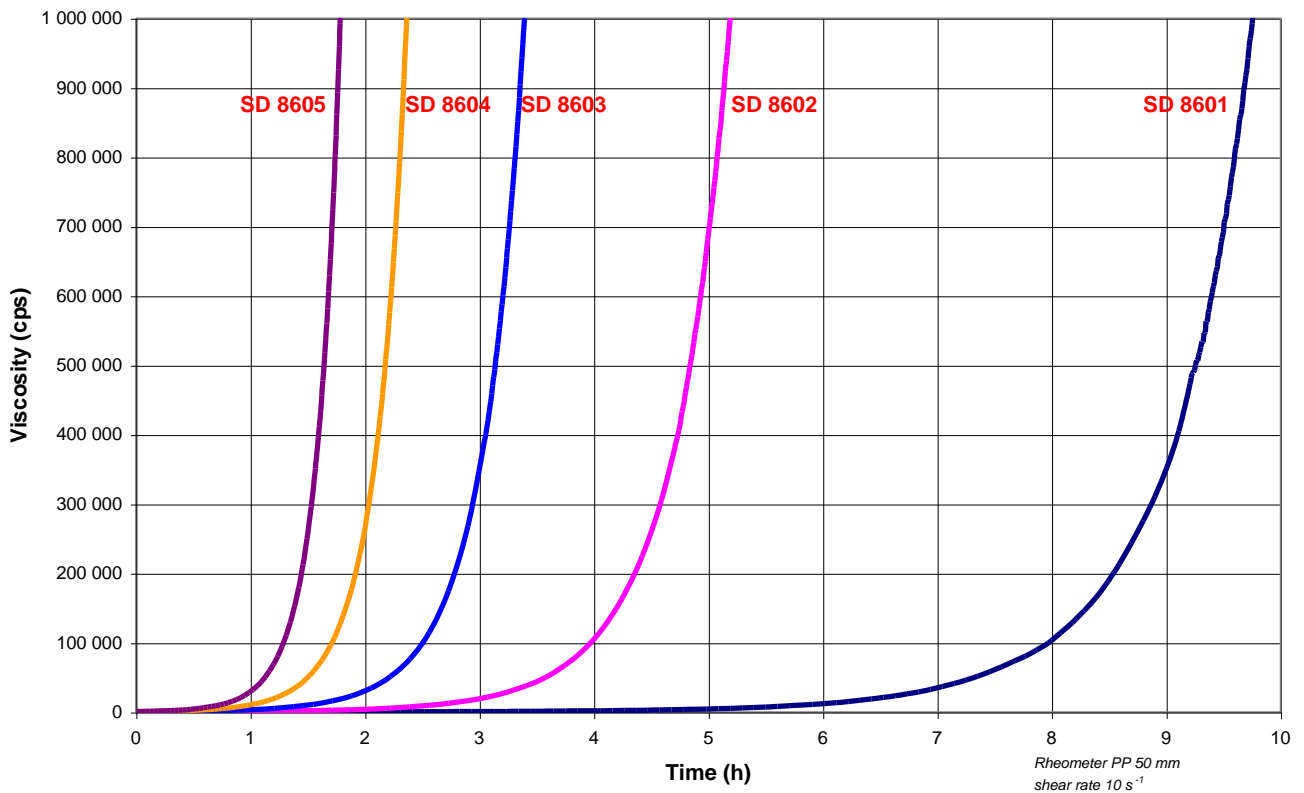
SR 8500 / SD 860x mass reactivity

		SR 8500 / SD 8605	SR 8500 / SD 8604	SR 8500 / SD 8603	SR 8500 / SD 8602	SR 8500 / SD 8601
Exothermic peak (°C) on 500 g mix:						
	30°C	255	262	245	234	132
	25°C	246	250	240	217	80
	20°C	237	236	205	130	33
Time to reach exothermic peak on 500 g mix						
	30°C	27'	33'	41'	1 H 10'	4 H 00
	25°C	29'	38'	1 H 00	1 H 57'	8 H 50'
	20°C	39'	1 H 00	1 H 55'	4 H 50'	15 H 10'
Time to reach 50 °C on 500 g mix						
	30°C	10'	21'	26'	52'	3 H 00
	25°C	17'	28'	44'	1H 38'	7 H 25'
	20°C	31'	44'	1 H 35'	4 H 15'	nm

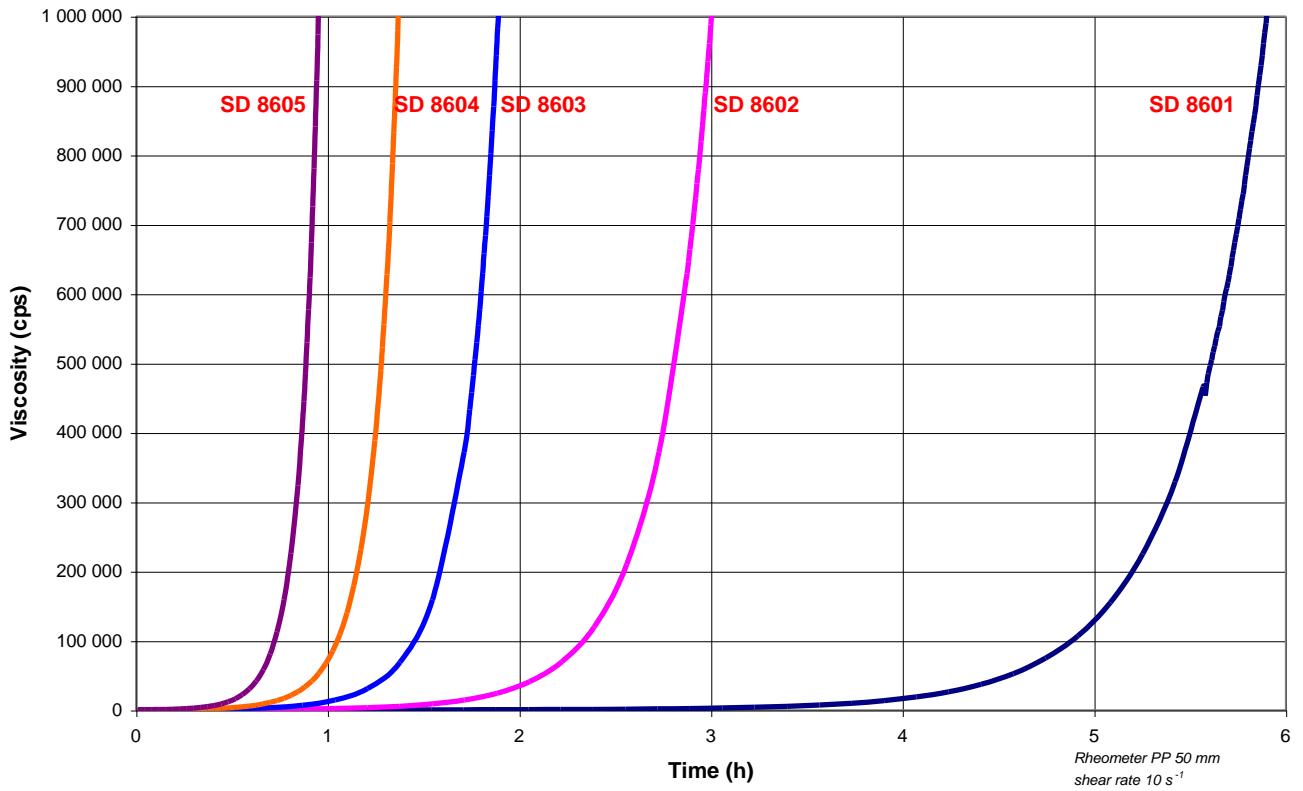
SR 8500 / SD 860x – 1 mm film viscosity evolution
- at 20 °C



- at 30 °C



- at 40 °C



Conditions of application

Ambient temperature: From 15°C to 40°C

Hygrometry: Below 80%

Temperature of the substrate: 5°C over the dew point

SR 8500 based formulations

- SR 8500 TH2 :

Version : Thixotropic
 Colour : Translucent, slightly opalescent
 Application : Vertical multiaxial lamination
 Weight ratio : **SR 8500 TH2 / SD 860x:** 100 / 34.5
SR 8500 TH2 / SD 7160 100 / 46

- SR 8500 Gel :

Version : Thixotropic
 Colour : Clear or black
 Application : Structural bondings for foams and honeycombs
 Apply with toothed spatula on vertical surface or ceiling
 Weight ratio : **SR 8500 Gel / SD 860x :** 100 / 33

- CA 85 :

Version : Filled
 Colour : White
 Application : high thickness castings, Structure wedging, harden under water, fire resistant.
 Weight ratio : **CA 85 / SD 8451** 100 / 25 Slow
CA 85 / SD 860x 100 / 17.5 -
CA 85 / SD 7160 100 / 24 Ultra slow
CA 85 / SD 1213 100 / 24 Ultra lent, low exothermic

- SR 8500 / SZ 8525 :

Application: Fast process at high temperature, fully cured after 10 min at 100 °C, clear laminates for sport goods

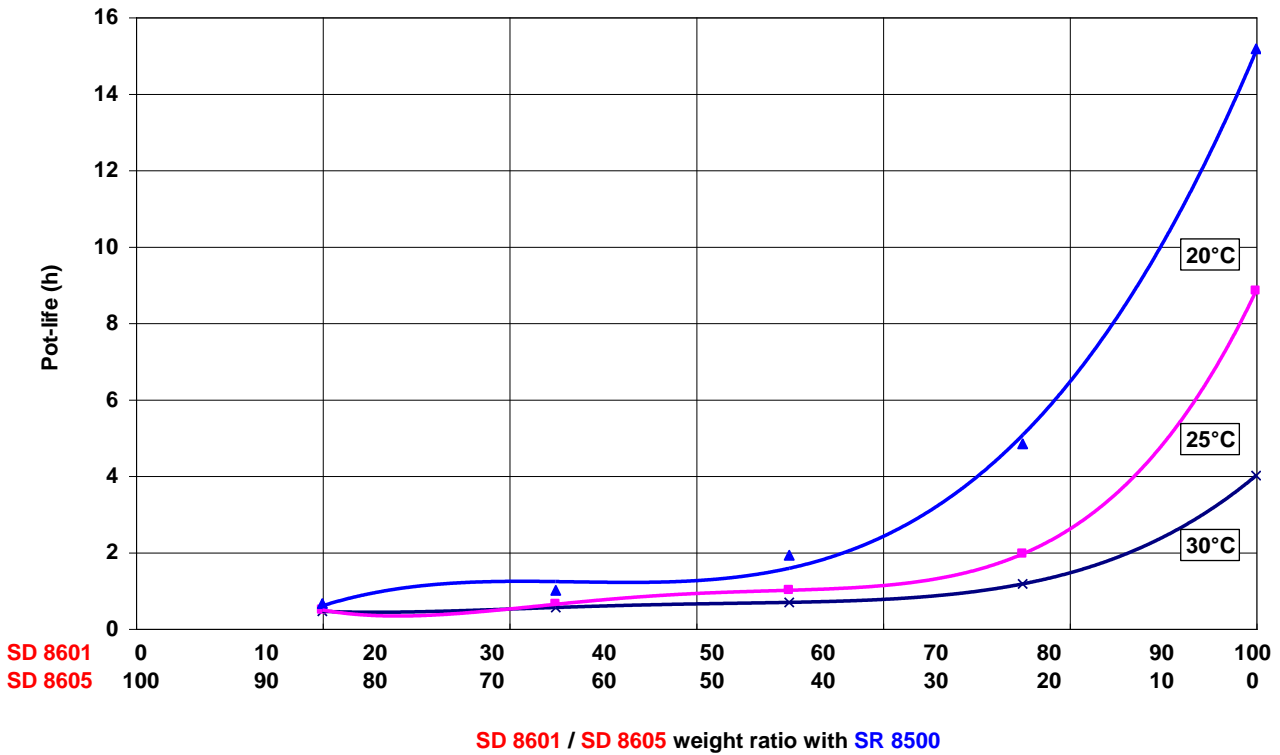
- SR 8500 / SD 7160 or SD 1213

Application : Translucent cast, high thickness laminates
 Weight ratio : **SR 8500 / SD 7160** 100 / 47 Ultra slow
SR 8500 / SD 1213 100 / 47 Ultra slow, low exothermic

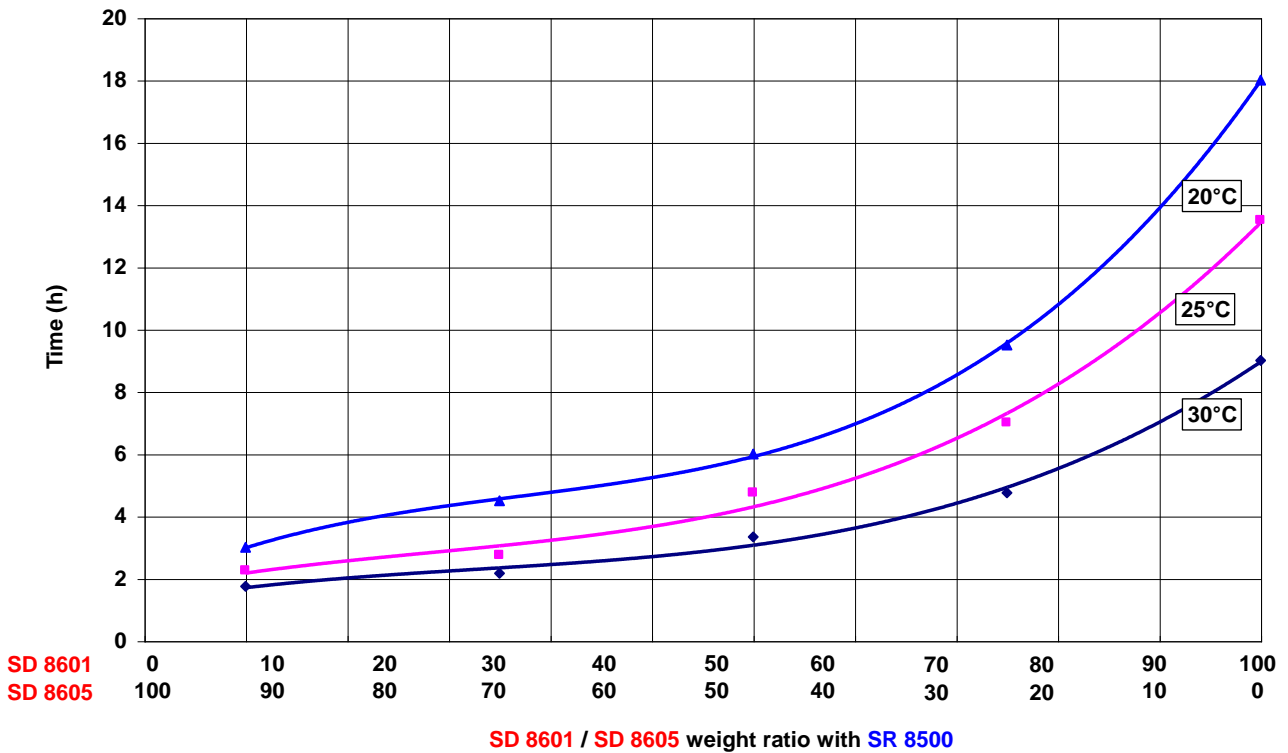
SR 8500 : Other combinations

	State	Hardeners	Weight ratio	Tg (°C) maximum	Possible applications
SR 8500	Liquid	SD 2705	100 / 20	110	Fast laminating hardener, very good mechanical and chemical resistance
		SD 8203	100 / 31	120	Laminates for tooling up to 100 °C
		SD 8202	100 / 31	123	
SR 8500 TH2	Slightly thixotropic	SD 8203 SD 8202	100 / 30.5 100 / 30.5	120 123	Vertical laminates with better thermal resistance
SR 8500 Gel	Black or Clear gel	SD 1249.17	100 / 44	100	Gel for structural bondings, fast hardening, for service temperature < 80°C

500 g mix exothermic peak vs. SD 8601 / SD 8605 ratio



Dust free time on 0.5 mm film vs. SD 8601 / SD 8605 ratio



Mechanical properties of pure resin

Curing Schedule	SR 8500 / SD 8601					SR 8500 / SD 8605					
	14 days 23°C	24 h 23°C + 24 h 40°C	24 h 23°C + 15 h 50°C	24 h 23°C + 16 h 60°C	24 h 23°C + 8 h 80°C	7 days 23°C	24 h 23°C + 24 h 40°C	24 h 23°C + 20 h 50°C	24 h 23°C + 8 h 60°C	24 h 23°C + 16 h 60°C	
Tension											
Modulus of elasticity	N/mm ²	3390	3350	3250	3070	2800	3580	3500	3300	3390	3320
Maximum resistance	N/mm ²	42	54	77	76	69	72	82	80	80	85
Resistance at break	N/mm ²	42	54	71	72	64	72	80	77	78	83
Elongation at max. resistance	%	1.2	1.7	3.4	3.9	4.0	2.3	3.5	3.3	3.6	4.9
Elongation at break	%	1.2	1.7	4.0	4.7	4.8	2.3	3.7	3.9	4.2	5.7
Flexion											
Modulus of elasticity	N/mm ²	3540	3400	3300	3280	3050	3630	3570	3510	3445	3210
Maximum resistance	N/mm ²	69	102	118	120	112	119	128	128	127	124
Elongation at max. resistance	%	1.8	3.5	4.8	5.3	5.4	4.1	4.9	5.3	5.5	5.8
Elongation at break	%	1.8	8.4	9.0	9.1	10.7	4.2	6.7	7.5	7.2	5.6
Compression											
Compressive yield strength	N/mm ²		104		98	91					
Offset compressive yield	%		5.6		6.2	7.4					
Charpy impact strength											
Resilience	kJ/m ²	9	22	47	54	65	20	25	33	20	32
Glass Transition / DSC											
Tg 1	°C	51	61	71	76	87	58	67	75	79	82
Tg 1 max	°C			83	84	87				91	91

Tests carried out on samples of pure cast resin, without prior degassing, between steel plates.

Measures undertaken according to the following norms :

Tension: NF T 51-034

Flexion : NF T 51-001

Compression: NF T 51-101

Charpy impact strength: NF T 51-035

Glass transition DSC : ISO 11357-2 : 1999 -5°C to 180°C under nitrogen gaz

Tg1 or Onset : 1st point at 20 °C/mn

Tg1 maximum or Onset : second passage

Mechanical properties of pure resin

Curing Schedule	SR 8500 / SD 8602			SR 8500 / SD 8603			
	24 h 23°C + 24 h 40°C	24 h 23°C + 15 h 50°C	24 h 23°C + 16 h 60°C	7 days 23°C	24 h 23°C + 24 h 40°C	24 h 23°C + 16 h 60°C	
Tension							
Modulus of elasticity	N/mm ²	3420	3250	3150	3680	3620	3350
Maximum resistance	N/mm ²	75	79	80	50	85	83
Resistance at break	N/mm ²	74	78	79	50	83	81
Elongation at max. resistance	%	3.2	3.5	3.8	1.3	3.6	3.6
Elongation at break	%	3.5	3.8	4.6	1.3	3.9	4.6
Flexion							
Modulus of elasticity	N/mm ²	3400	3330	3200	3650	3550	3280
Maximum resistance	N/mm ²	115	118	122	93	123	124
Elongation at max. resistance	%	4.0	4.8	5.5	2.5	4.7	5.5
Elongation at break	%	8.3	8.5	8.8	2.5	8.1	8.3
Compressive							
Compressive yield strength	N/mm ²			109			114
Offset compressive yield	%			11.5			10.2
Charpy impact strength							
Resilience	kJ/m ²	25	28	35	15	27	30
Glass Transition / DSC							
Tg 1	°C	64	72	78	51	65	81
Tg 1 max	°C			86			88

Mechanical properties of laminates

Matrix Reinforcement material Number of layers Process Weight of reinforcement (Wf)		SR 8500 / SD 8601			SR 8500 / SD 8602		SR 8500 / SD 8603		SR 8500 / SD 8604	
		3300 15 Press 74			3300 15 Press 73		3300 15 Press 73		3300 15 Press 73	
Cure Schedule		24 h 40 °C	16 h 60°C	8 h 80°C	24 h 40°C	16 h 60°C	24 h 40°C	16 h 60°C	24 h 40°C	16 h 60°C
Flexion										
Modulus of elasticity	N/mm ²	27 800	28 000	27 600	26900	26 100	23 200	25 000	25 600	25 900
Maximum resistance	N/mm ²	662	668	675	685	680	615	660	675	665
Maximum elongation	%	2.9	2.9	2.9	3.2	3.2	3.3	3.2	3.2	3.2
Bending delamination										
Shear load at break	N/mm ²	51	53	55	53	55	54	59	56	56
Impact (Choc Charpy)										
Resilience	kJ/m ²	186	183	189	200	205	190	205	205	210
Water Absorption										
	% weight	+ 0.19	+ 0.17	+ 0.15	+ 0.28	+ 0.27	+ 0.28	+ 0.27	+ 0.28	+ 0.26
Glass Transition										
Tg 1	°C	64	76	85	67	82	74	83	68	84
Tg 1 max.	°C			87		87		88		91

Tests carried out on samples of pure cast resin, without prior degassing, between steel plates.

Measures undertaken according to Afnor norms :

Flexural: NF T 57-105

Flexural Delamination: NF T 57-104

Impact : NF T 57-108

Glass transition : DSC 1° point at 10°C / mn

Water absorption : Internal. Polymerisation according a cycle, weighing, time spent in water distilled à 70 °C / 48 hours, weighing 1 hr after removal, drying 24 hr / 40°C, weighing, mechanical tests on 10 samples

Reinforcement : 3300: E Glass, 2/2 Twill, 300 g/m²

Aircell HR - HTR

Aircell HR - HTR is a partially cross-linked, structural cellular PVC foam, ideal for composite sandwich structures. Compatible with most resin systems; polyester, vinylester, phenolic or epoxy. **Aircell** can be processed at room temperature or at any temperature below 80°C. Developed for the marine industry, windmills, transport and composite applications in general. **Aircell** can be supplied in different sheets, either rigid or flexible, to be adapted to different surface shapes. For series production, **Aircell** can also be supplied in kit form to reduce processing time and wastage.

Technical Data Sheet - Aircell HR - HTR

Issue 01/08. Rev.3

Property	Method	Unit	HR 40	HR 45	HR 60	HR 80	HTR 80	HR 100	HR 130	HR 200
Nominal Density	ISO 845	kg/m ³	40	48	60	80	80	100	130	200
Compressive Strength	ISO 844	N/mm ²	0,45	0,6	0,9	1,3	1,3	1,9	2,6	4,8
Compressive Modulus	DIN 53421	N/mm ²	37	48	69	97	97	125	160	260
Tensile Strength	DIN 53571	N/mm ²	0,7	1,10	1,30	2,00	2,00	2,70	3,80	6,20
Tensile Modulus	DIN 53457	N/mm ²	28	35	45	66	66	84	115	180
Shear Strength	ISO 1922	N/mm ²	0,45	0,55	0,80	1,20	1,20	1,60	2,30	3,50
Shear Modulus	ASTM C393	N/mm ²	13	15	22	30	30	38	50	75
Shear Strain	ISO 1922	%	8	10	16	23	23	27	30	30
Thermal Conductivity	ISO 8301	W/m.k	0,031	0,031	0,031	0,033	0,033	0,035	0,039	0,048
Water Absorption	ASTM 272	kg/m ²	0,09	0,09	0,07	0,06	0,06	0,04	0,03	0,02
Thermal Bending Stability	DIN 53424	°C	80	80	85	85	100	90	95	100

Density tolerance $\pm 10\%$. Continuous operating temperature is -200°C to 70°C. Maximum processing temperature is dependent on time and the pressure applied, but can be processed up to 80°C. Material can be heat treated for higher temperature resistance of 100°C. For higher temperatures or any other issue, please contact MEL Composites for assistance.



Aircell is a Trade Mark.

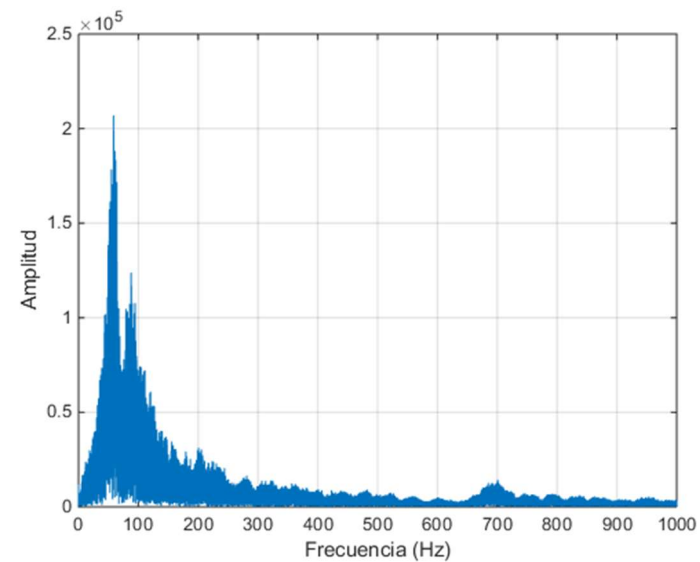
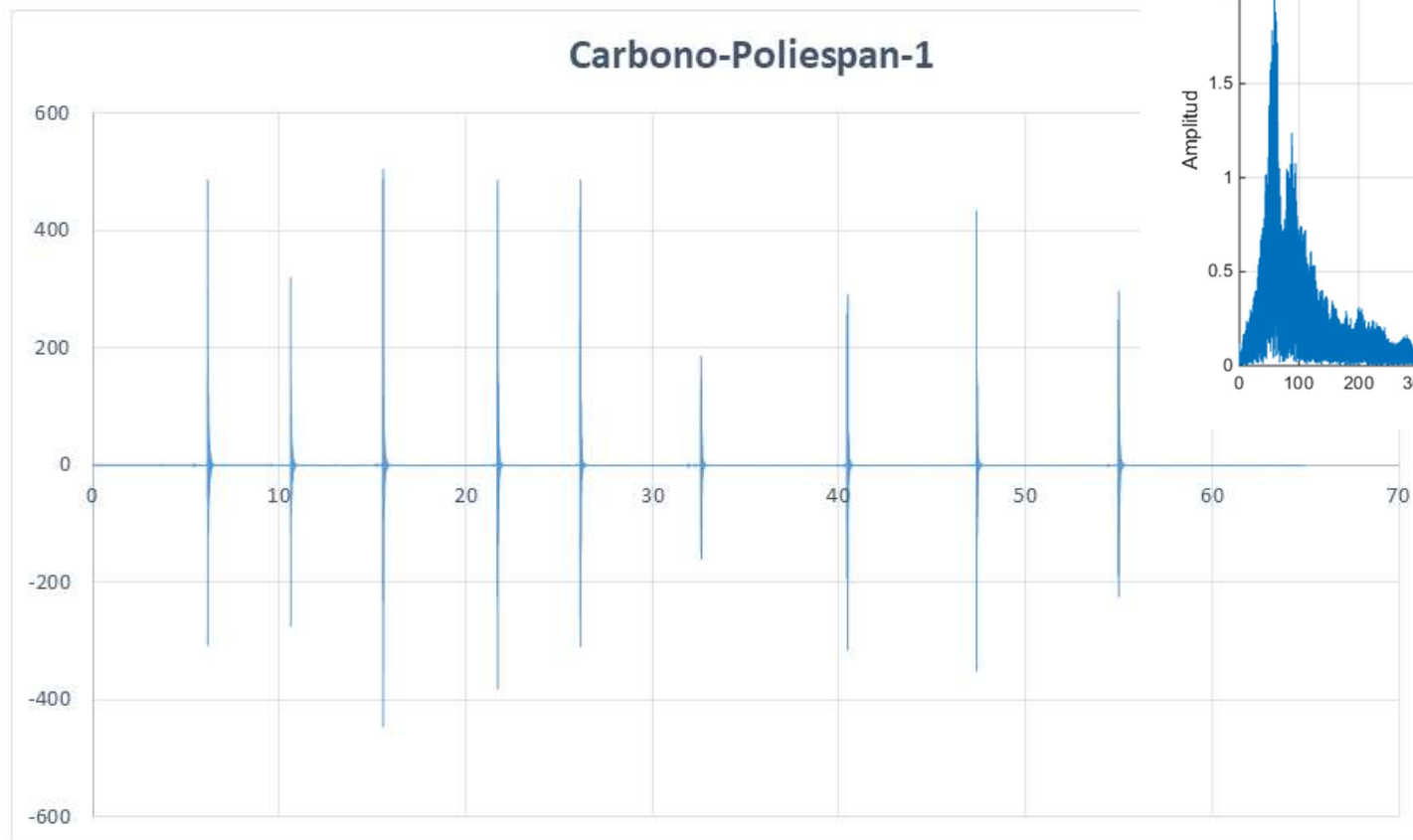
Materiales Estructurales Ligeros, S.L. Ctra. Barcelona 88-B - 08302 - Mataró (BCN) SPAIN. Tel: + 34 93 741 54 54 Fax: + 34 93 799 46 00 www.melcomposites.com

ANEXO II

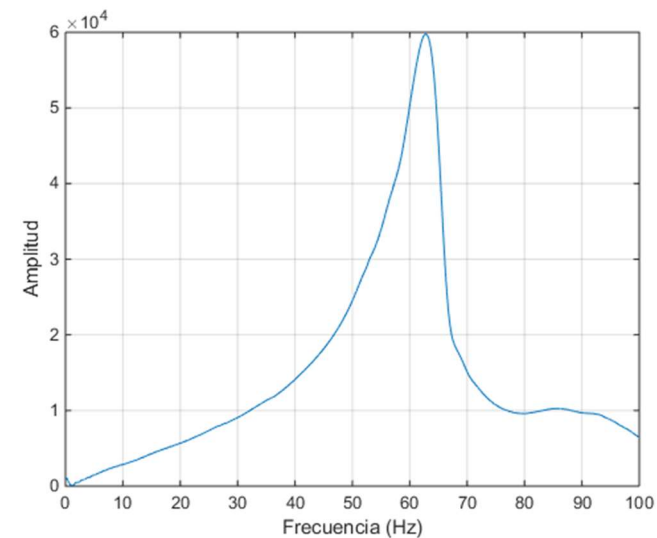
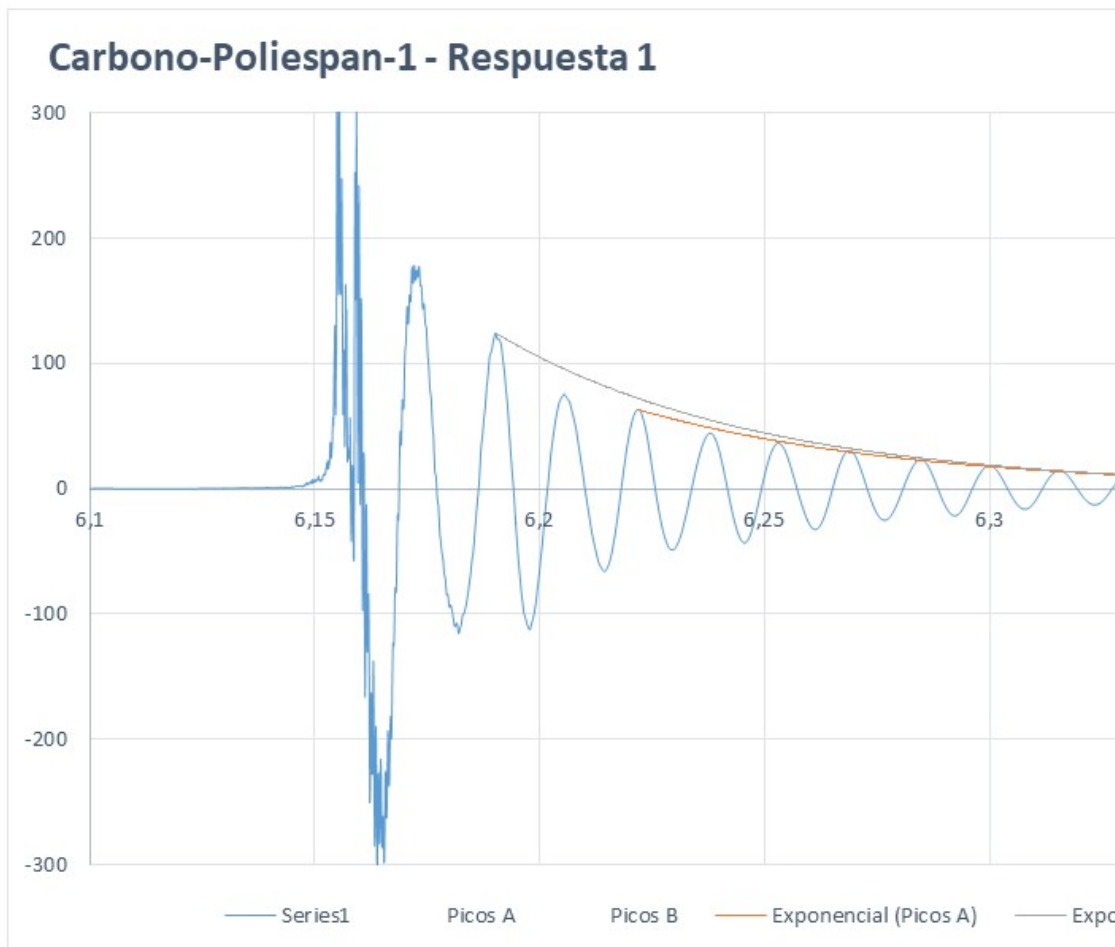
Resultados de los ensayos dinámicos completos

ÍNDICE

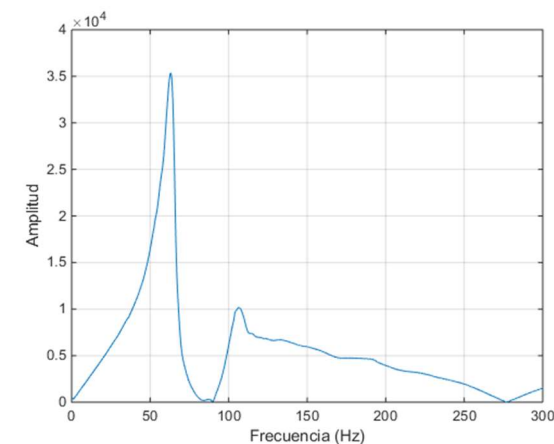
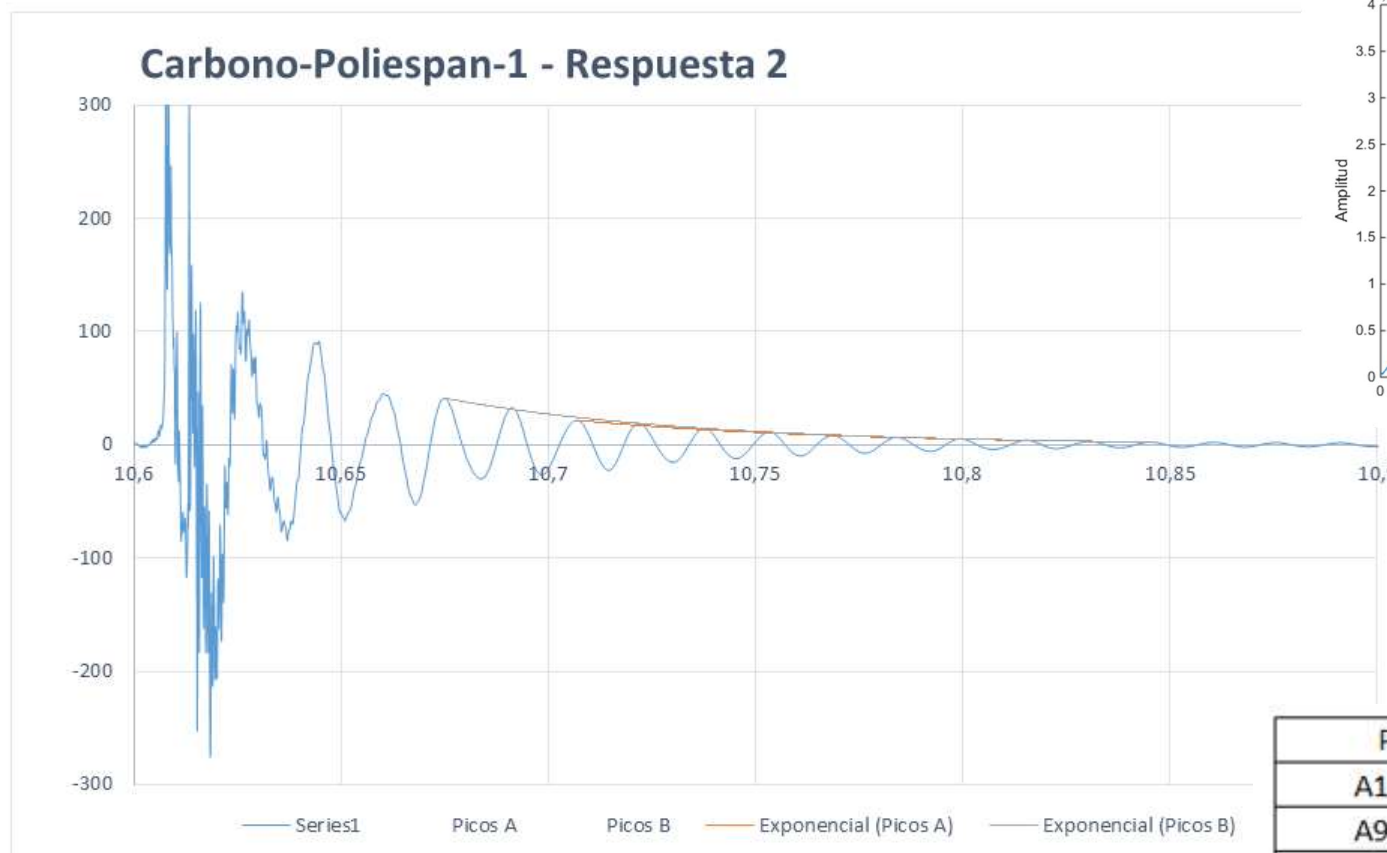
- Resultados de los ensayos dinámicos en núcleos de poliespan
- Resultados de los ensayos dinámicos en núcleos de corecell
- Resultados de los ensayos dinámicos en núcleos de madera
- Resultados de la prueba con caucho a una muestra con núcleo de madera



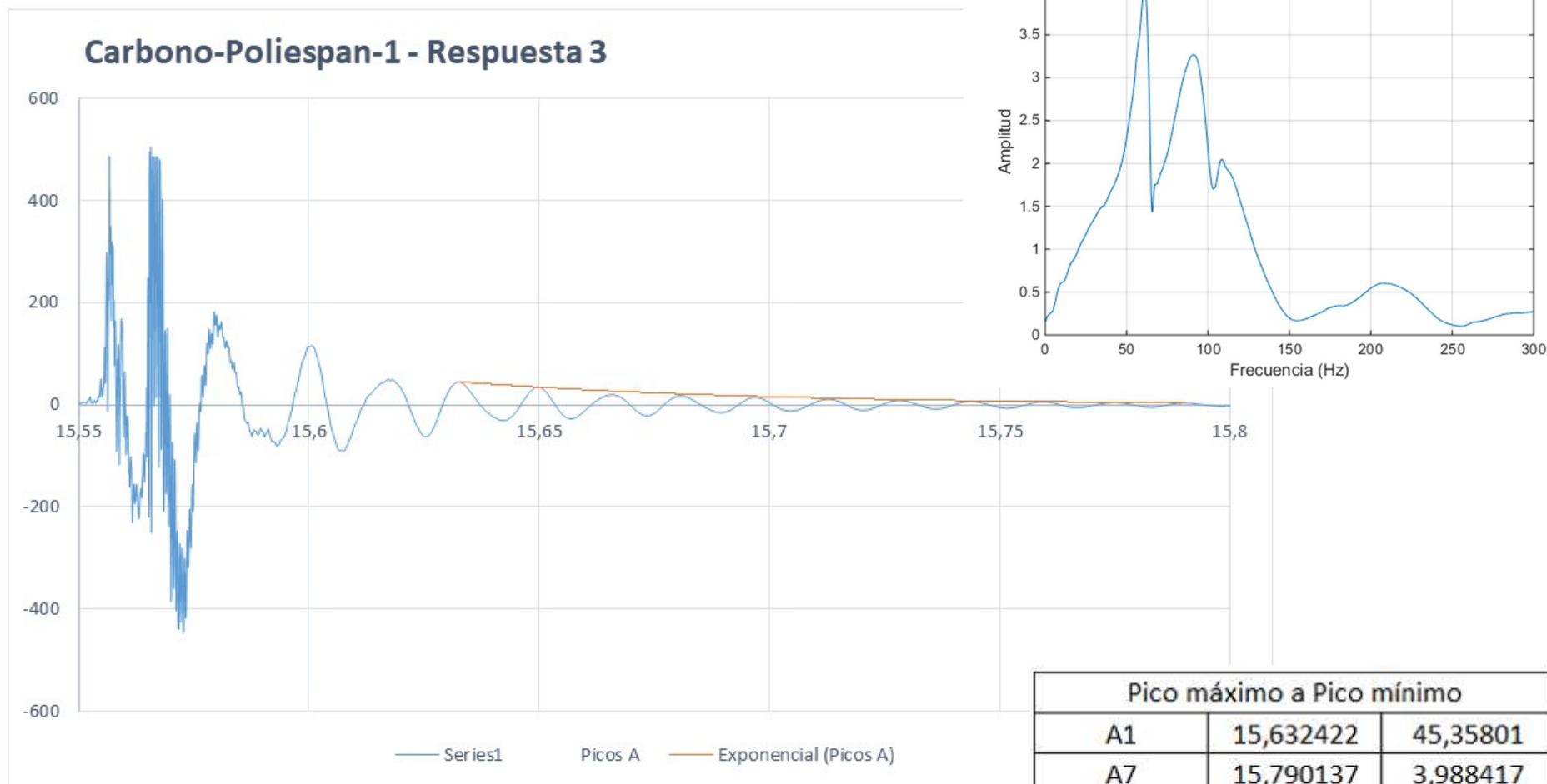
Channels	1
Samples	665600
Date	26/03/2018
Time	20:01:55
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	19:33,8
Delta_X	9,77E-05



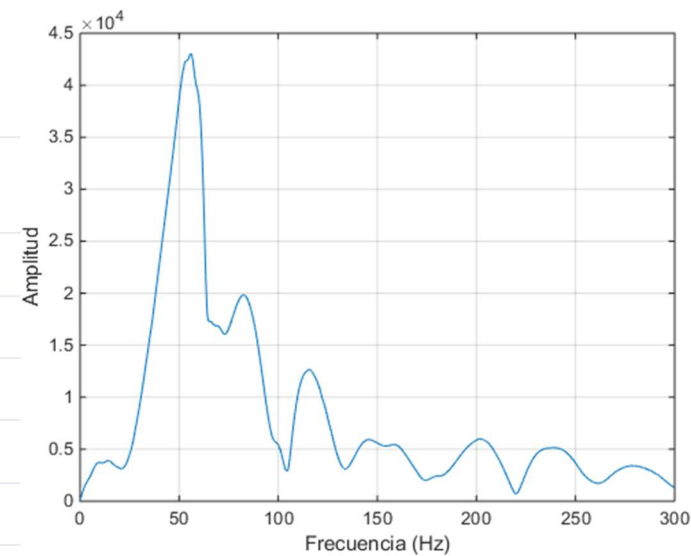
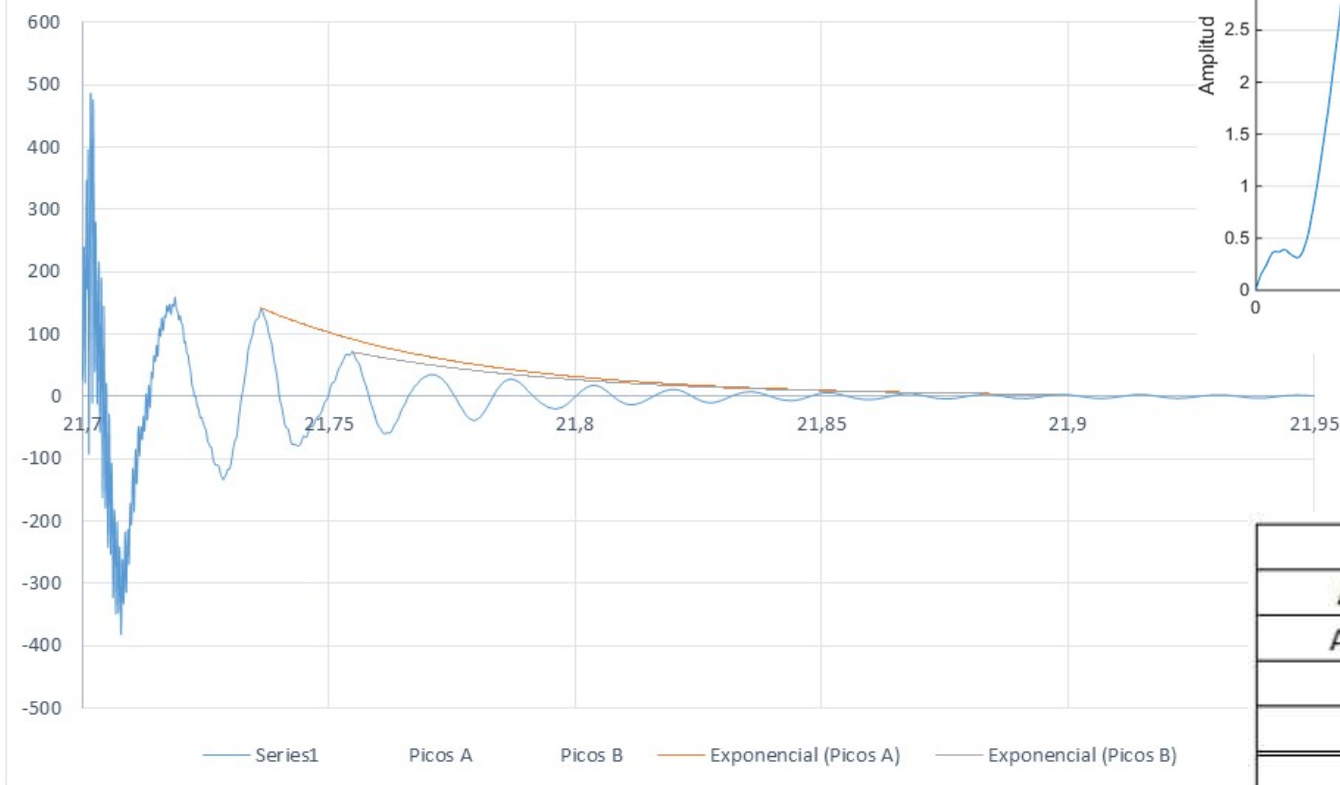
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	6,221777	63,25083
A10	6,376758	5,049723
δ	0,25277749	
ξ	0,04019827	
B1	6,190137	124,473243
B12	6,376758	5,049723
δ	0,26706312	
ξ	0,04246607	



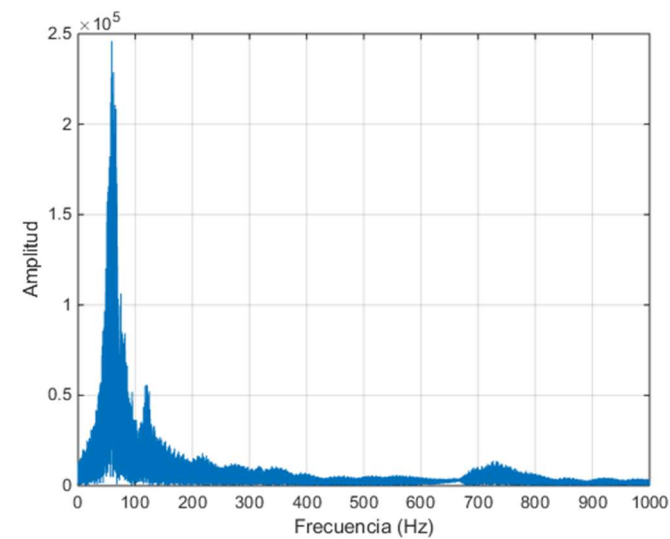
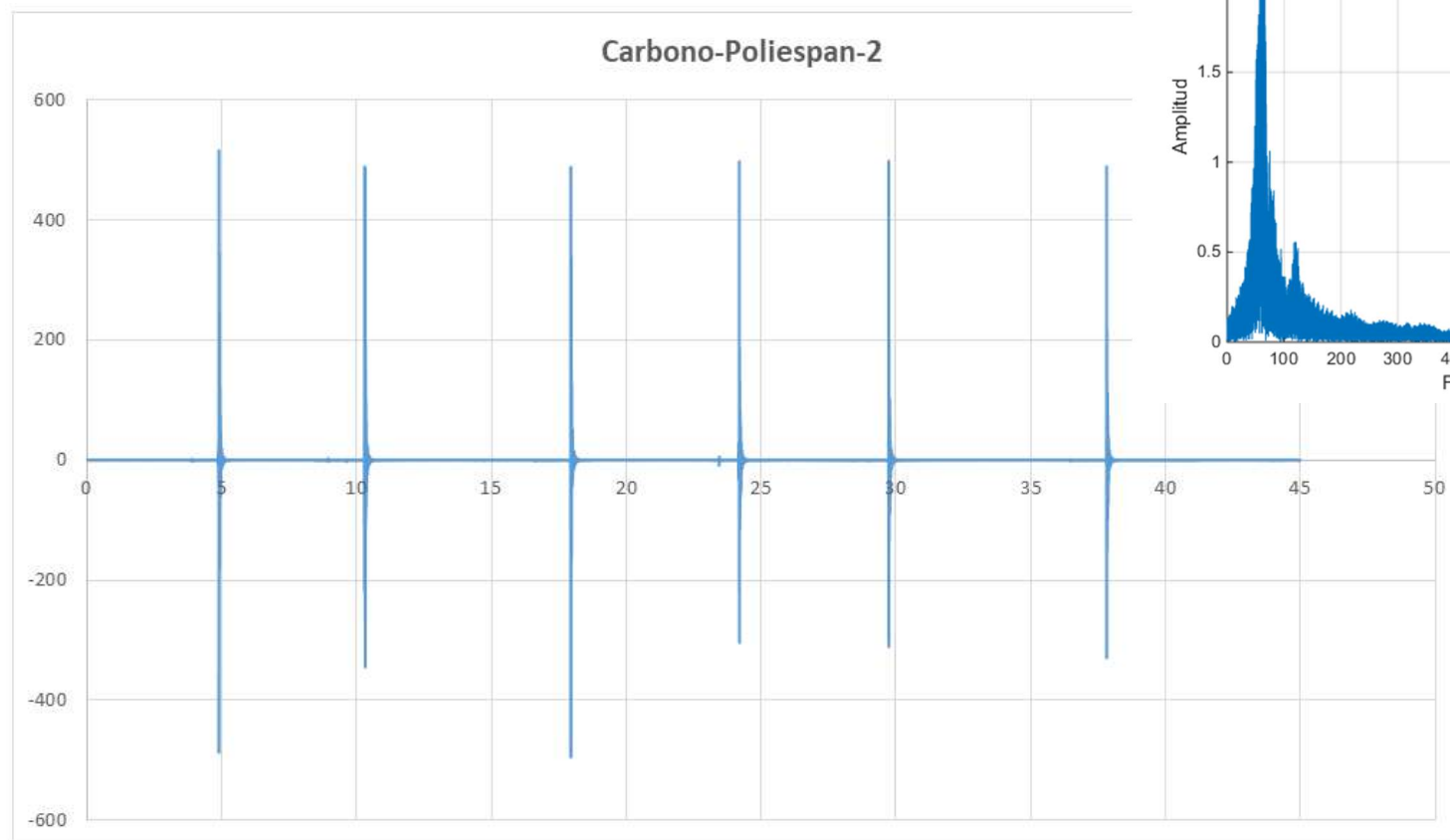
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	10,707031	21,618144
A9	10,845312	2,41508
δ	0,24353339	
ξ	0,03873046	
B1	10,675195	40,954581
B11	10,845312	2,41508
δ	0,25733921	
ξ	0,0409225	



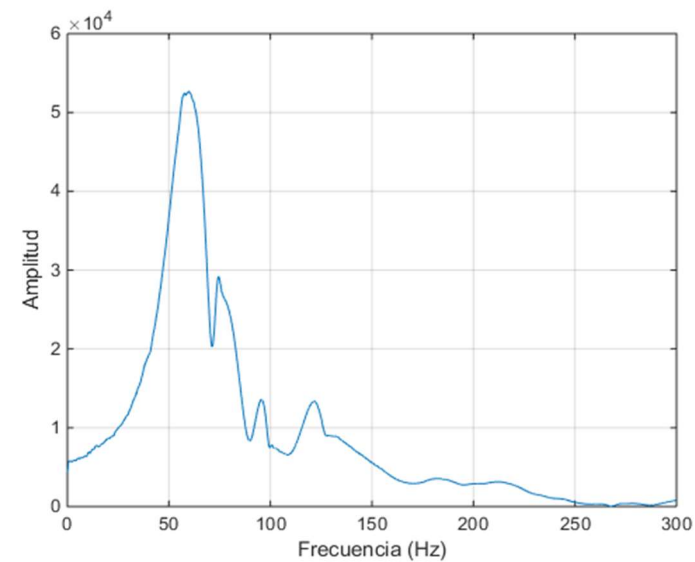
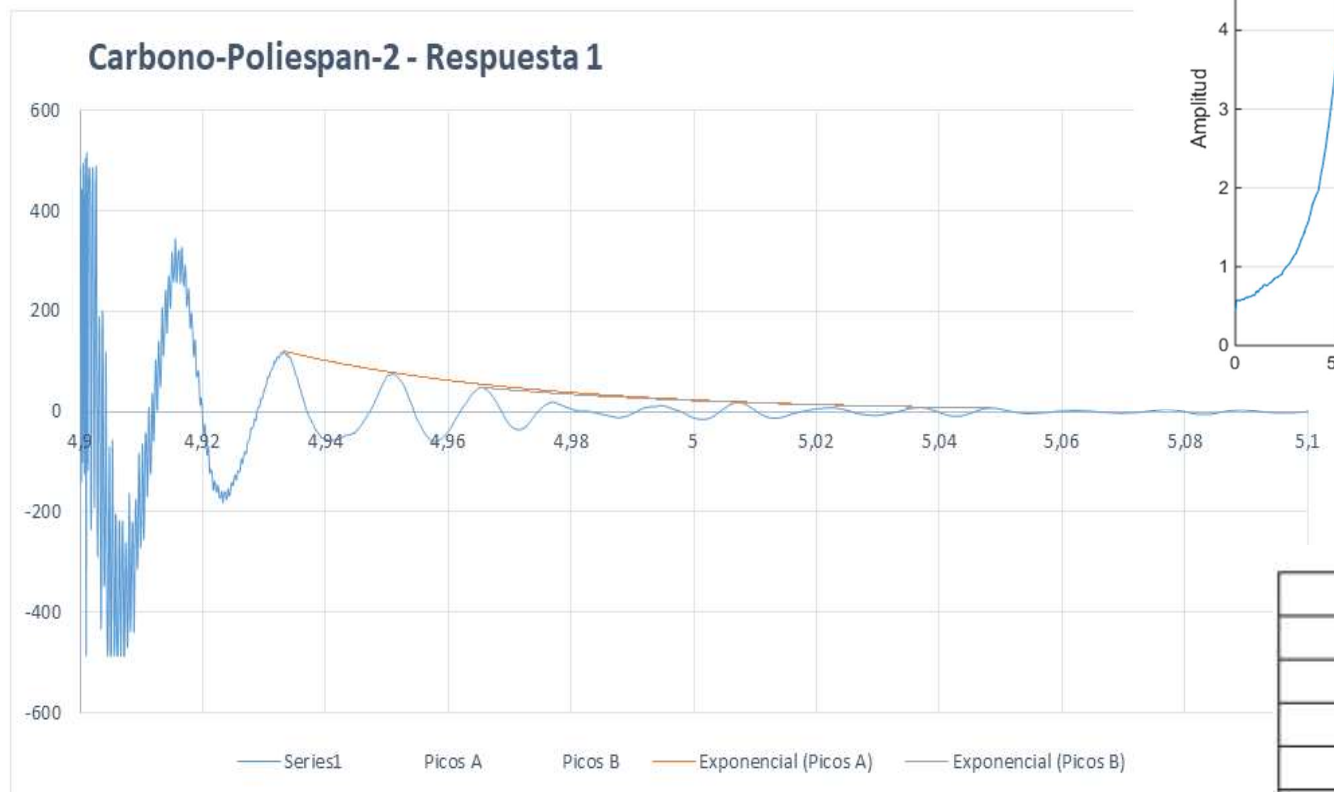
Carbono-Poliespan-1 - Respuesta 4



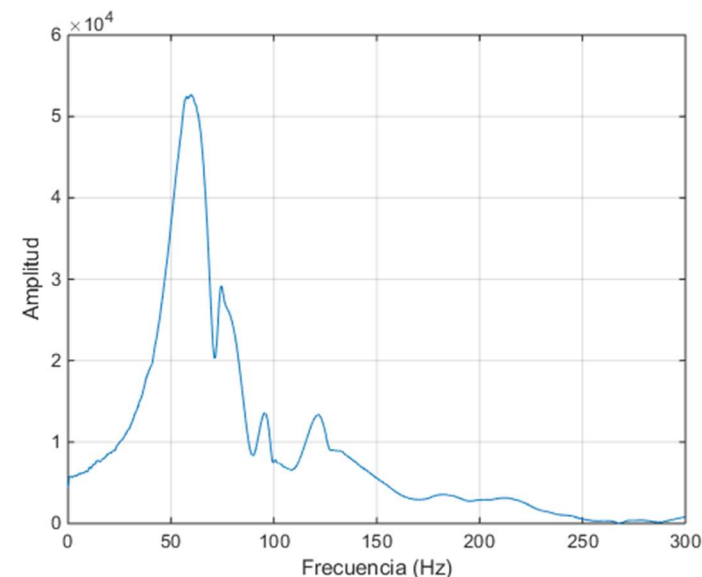
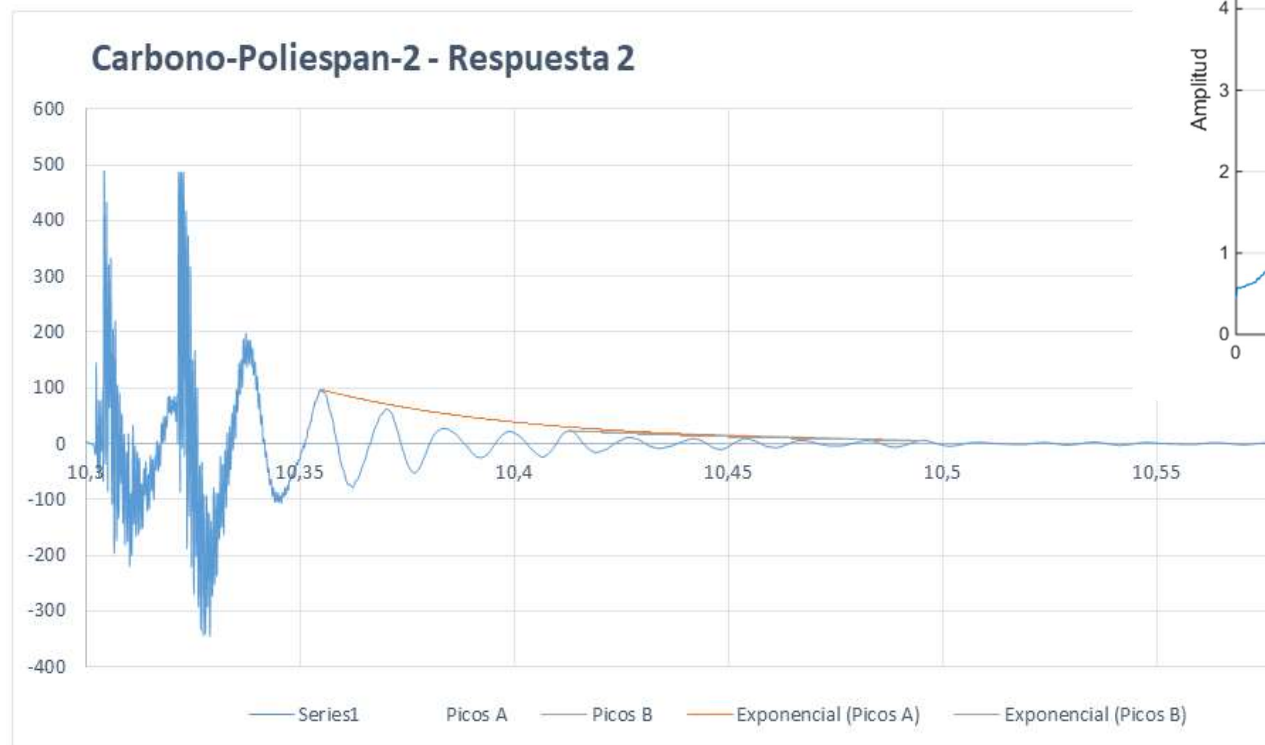
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	21,736328	141,747693
A10	21,898145	3,180283
δ	0,37970785	
ξ	0,06032233	
B1	21,754883	71,19856
B9	21,898145	3,180283
δ	0,34538916	
ξ	0,05488753	



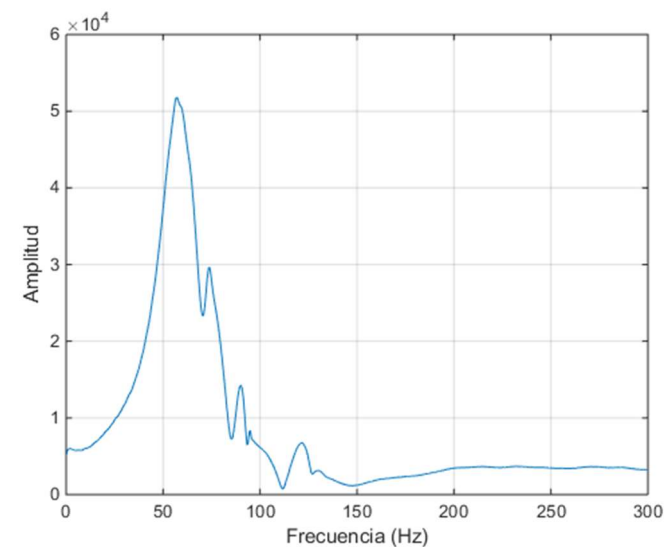
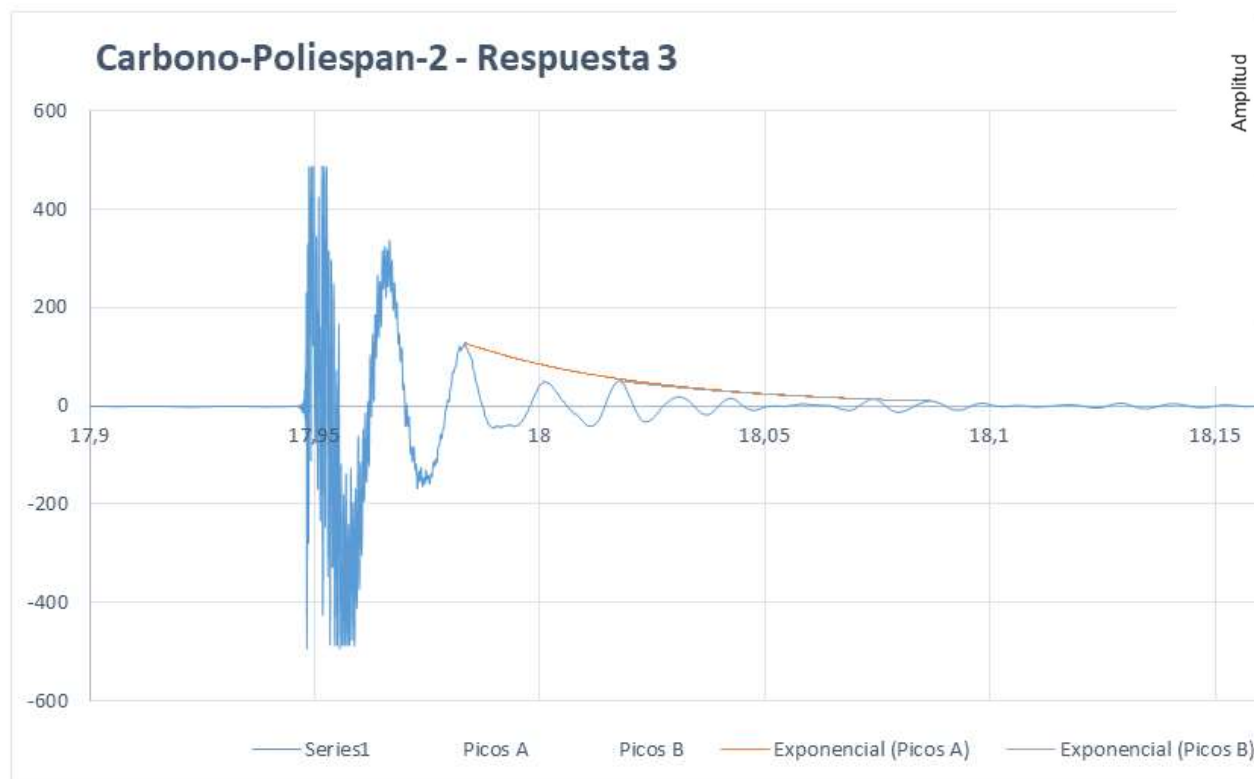
Channels	1
Samples	460800
Date	26/03/2018
Time	20:01:20
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	19:36,9
Delta_X	9,77E-05



Pico máximo a Pico mínimo		
A1	4,933203	120,475216
A8	5,048535	7,102254
δ	0,35387898	
ξ	0,05623247	
B1	4,965234	48,377343
B6	5,048535	7,102254
δ	0,3197699	
ξ	0,05082718	

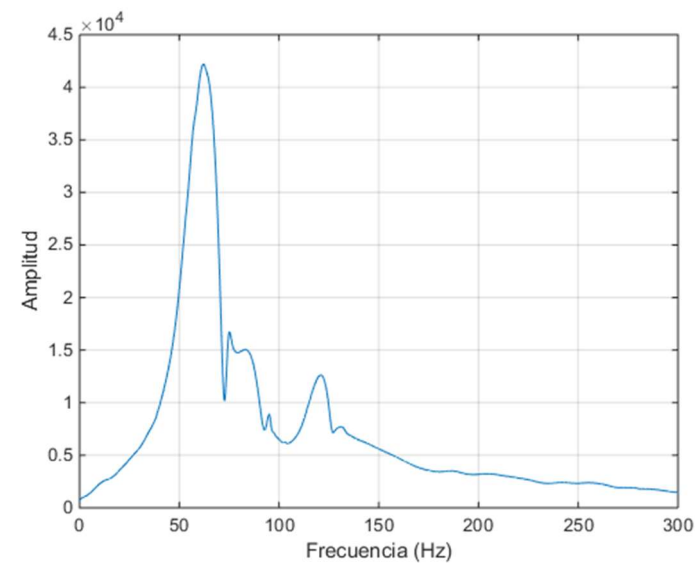
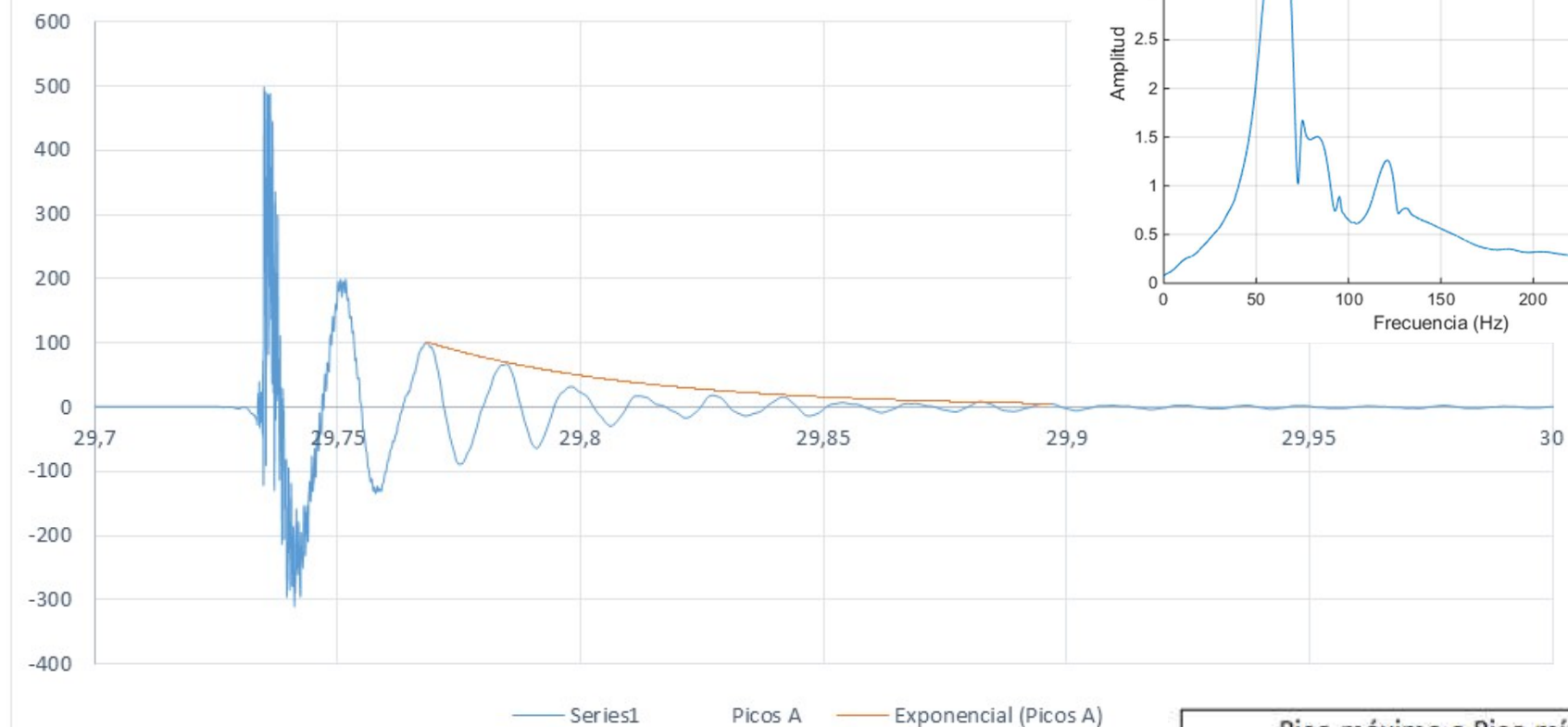


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	10,35498	96,874582
A10	10,495605	5,441839
δ	0,28793001	
ξ	0,04577744	
B1	10,412891	23,004212
B6	10,495605	5,441839
δ	0,24026005	
ξ	0,03821065	

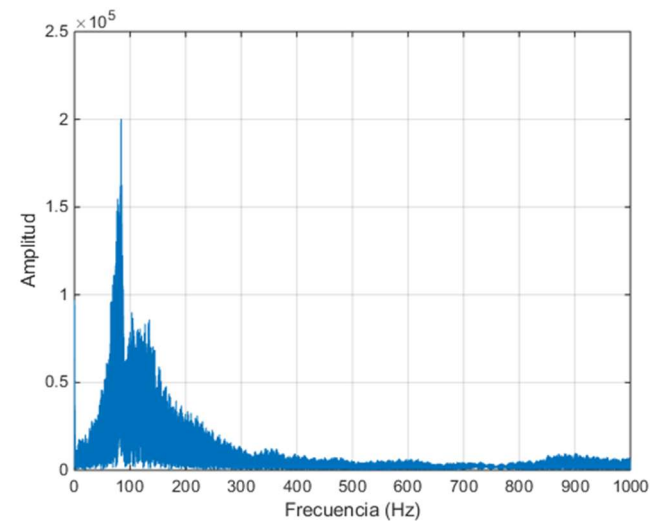
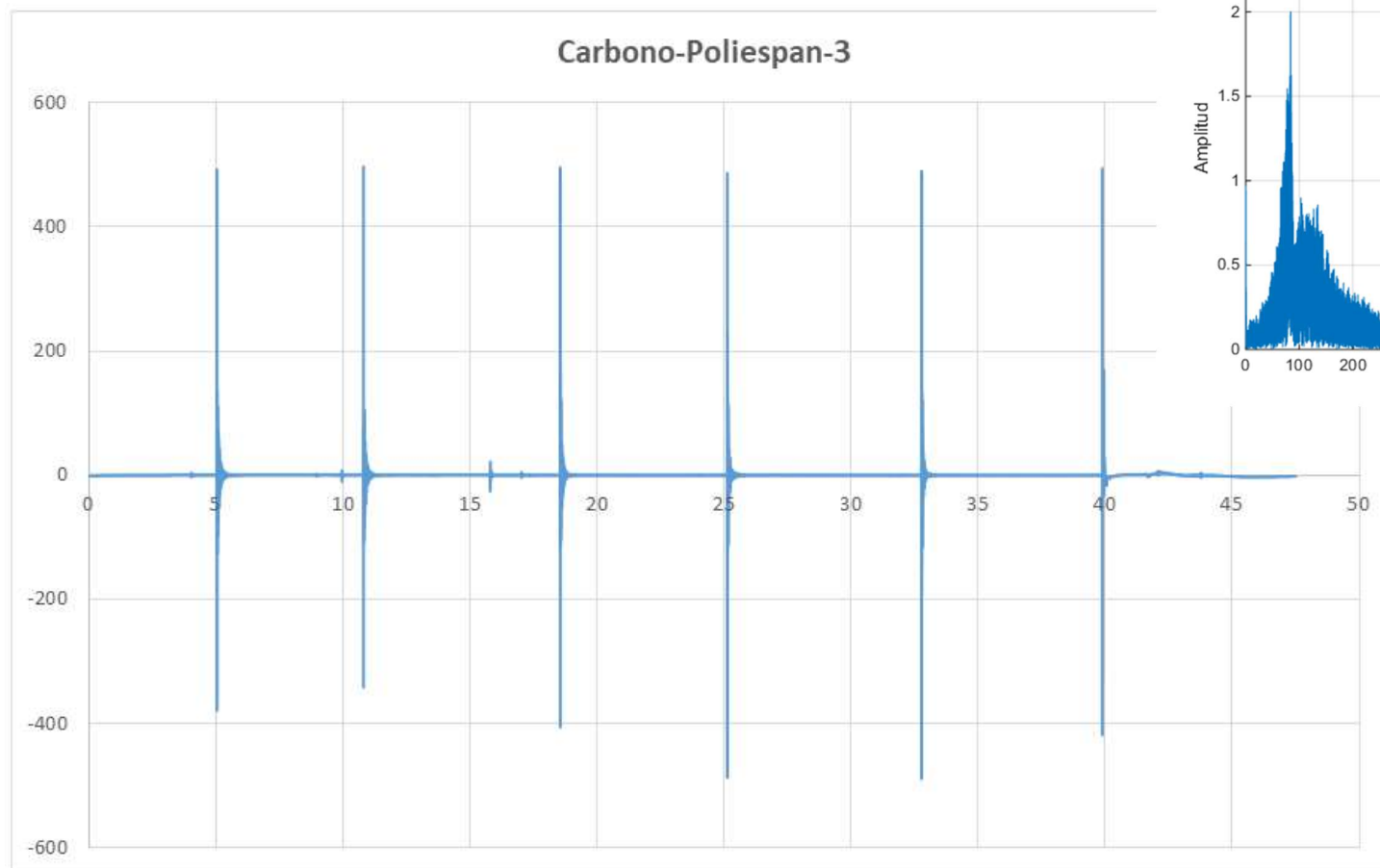


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	17,983301	128,160897
A7	18,086719	10,052029
δ	0,36364457	
ξ	0,05777914	
B1	18,017676	51,082183
B5	18,086719	10,052029
δ	0,32513225	
ξ	0,05167726	

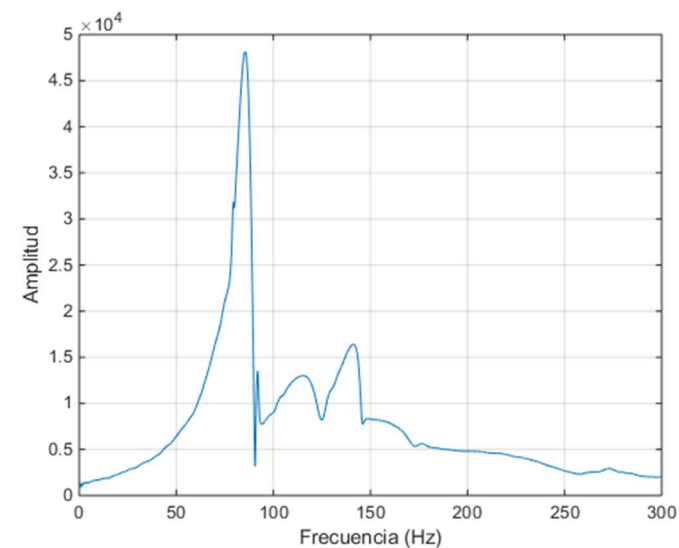
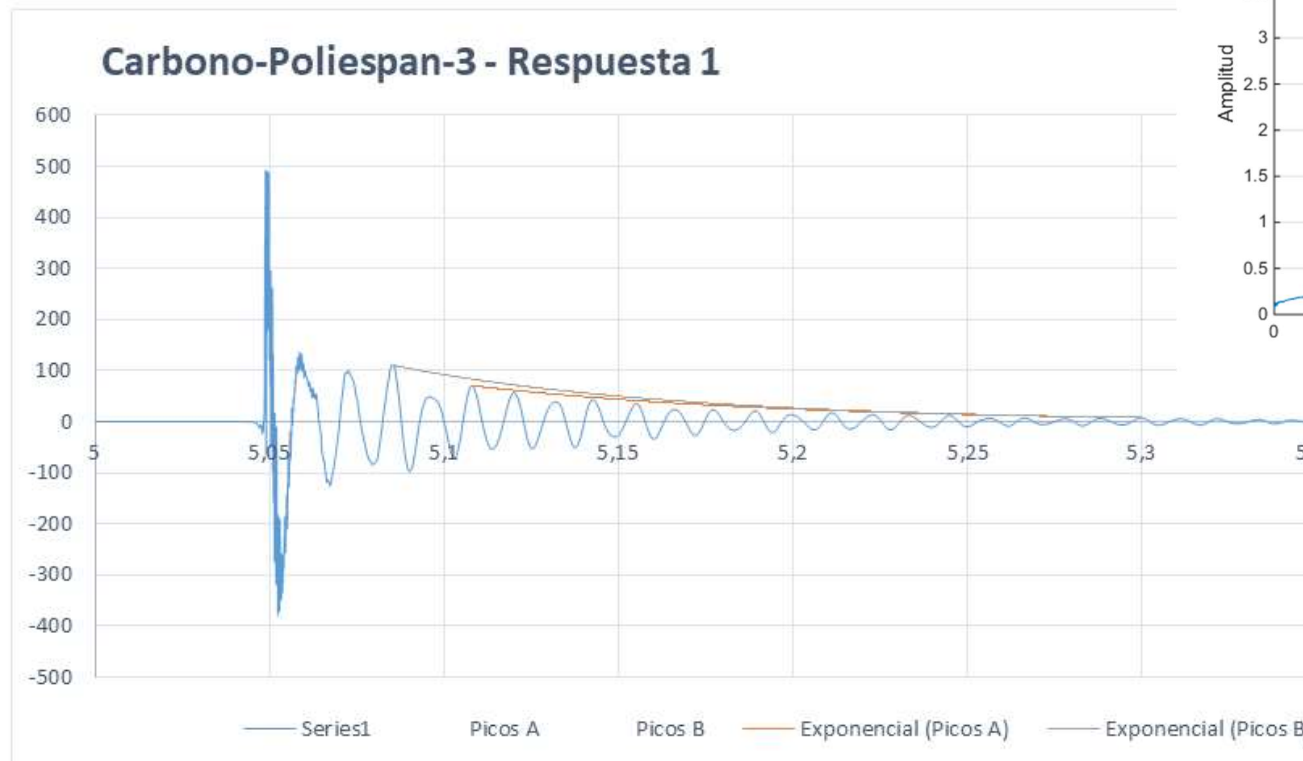
Carbono-Poliespan-2 - Respuesta 5



Pico máximo a Pico mínimo		
A1	29,768262	101,641062
A9	29,896484	5,483203
δ	0,32441758	
ξ	0,05156397	



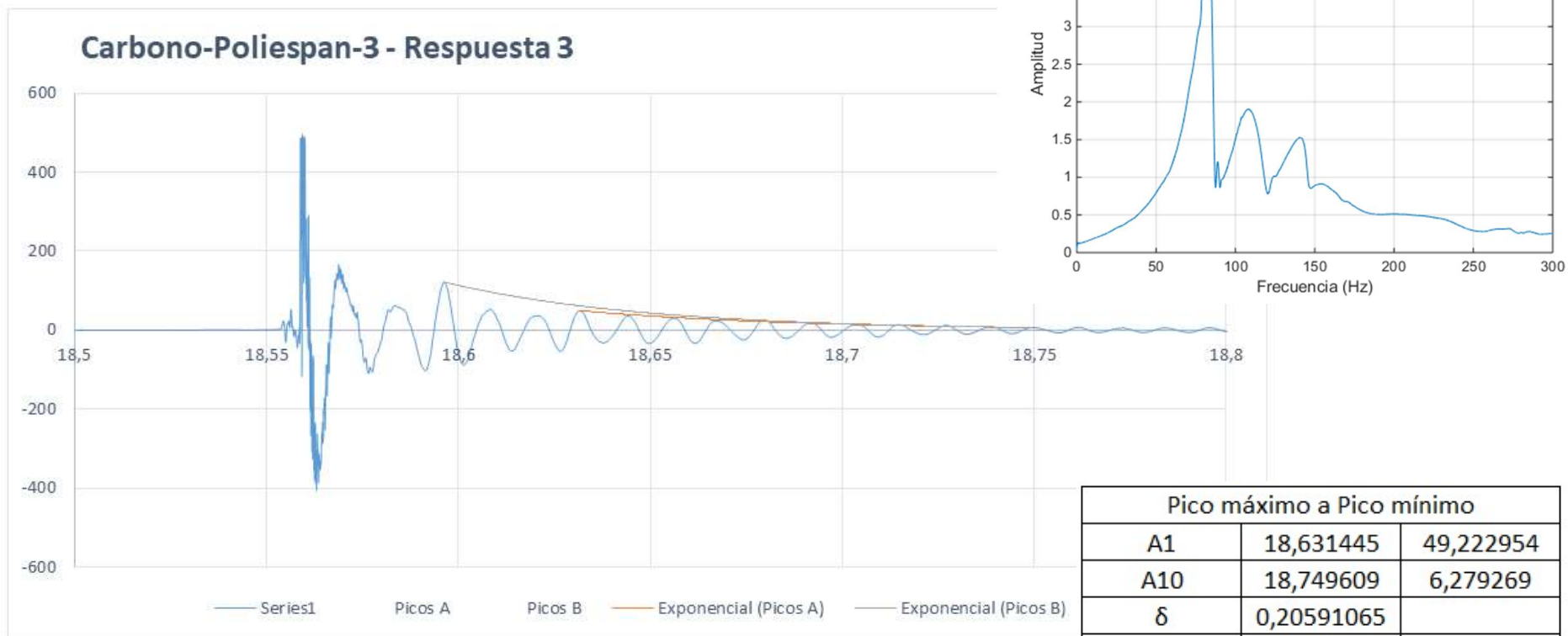
Channels	1
Samples	486400
Date	26/03/2018
Time	20:00:46
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	19:38,7
Delta_X	9,77E-05



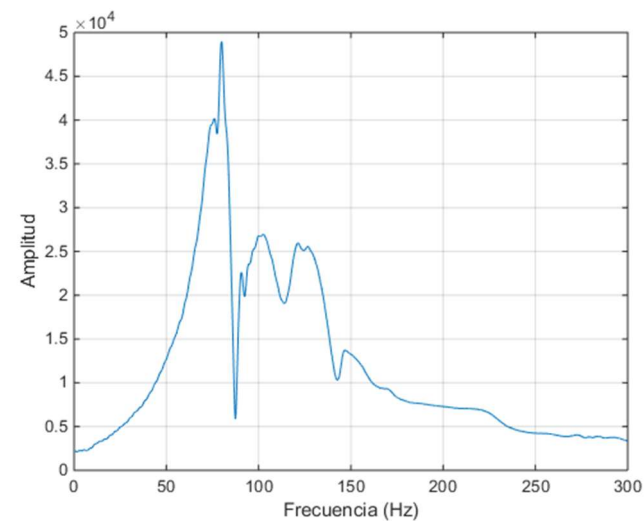
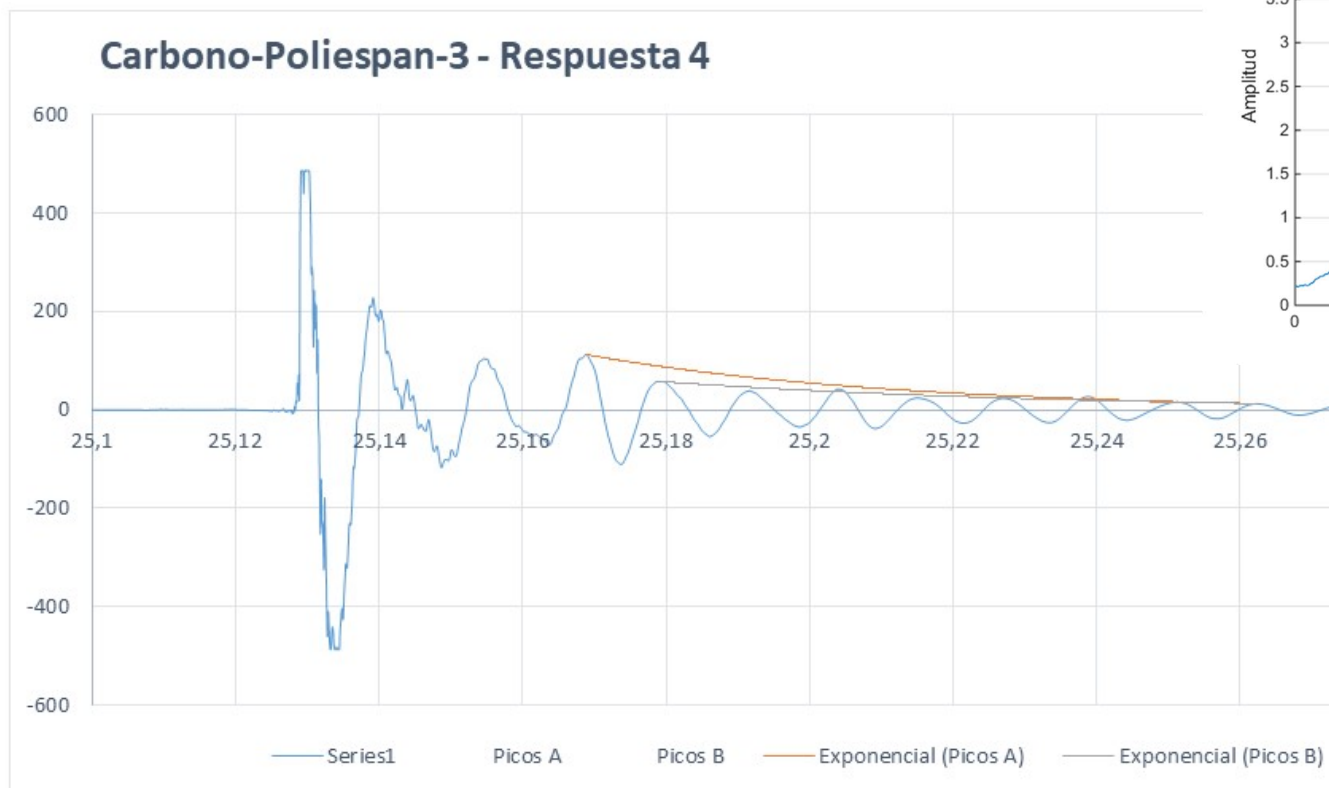
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	5,108008	70,5314
A17	5,299512	7,995088
δ	0,12807239	
ξ	0,02037912	
B1	5,085059	110,576131
B19	5,299512	7,995088
δ	0,13825668	
ξ	0,02199891	



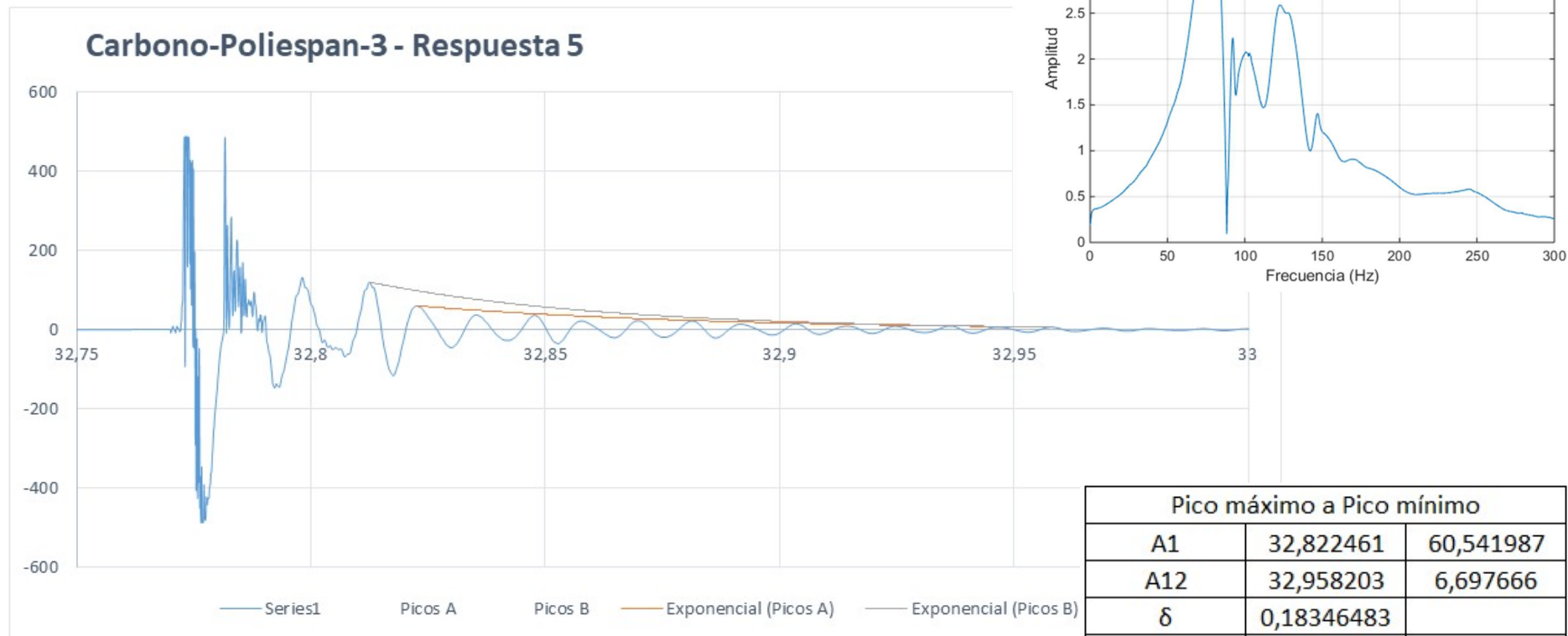
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	10,847754	104,005825
A12	10,985156	14,361823
δ	0,16498945	
ξ	0,02624984	
B1	10,882422	54,049188
B9	10,985156	14,361823
δ	0,14725789	
ξ	0,02343039	



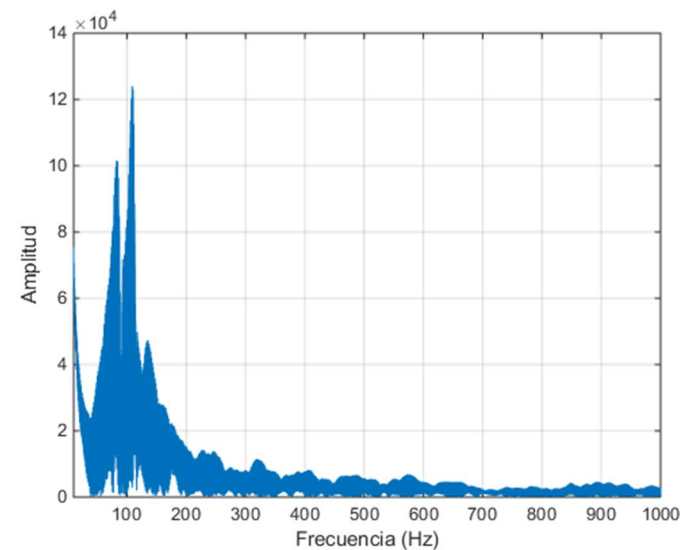
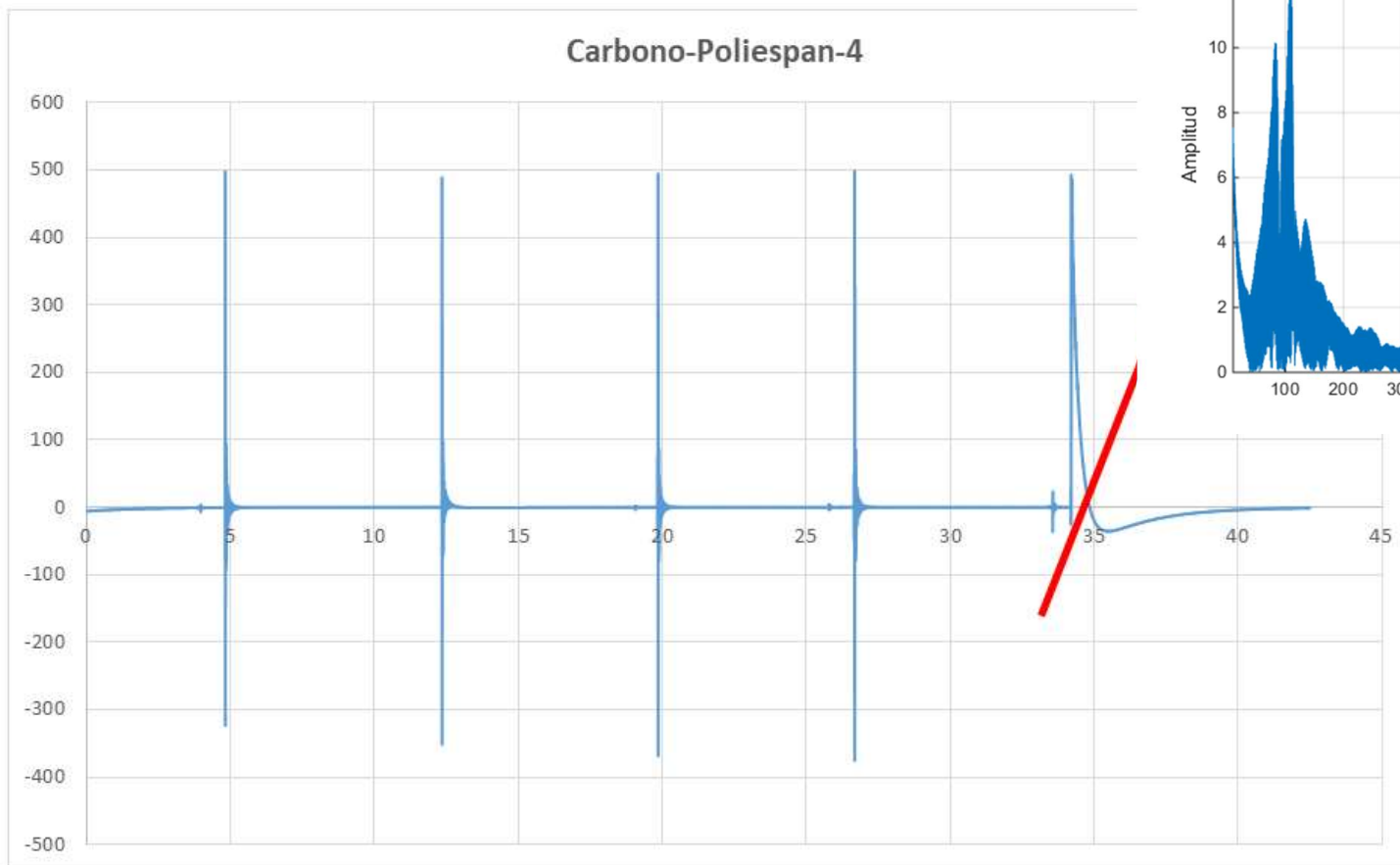
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	18,631445	49,222954
A10	18,749609	6,279269
δ	0,20591065	
ξ	0,03275411	
B1	18,596191	121,765677
B13	18,749609	6,279269
δ	0,09564016	
ξ	0,01521984	



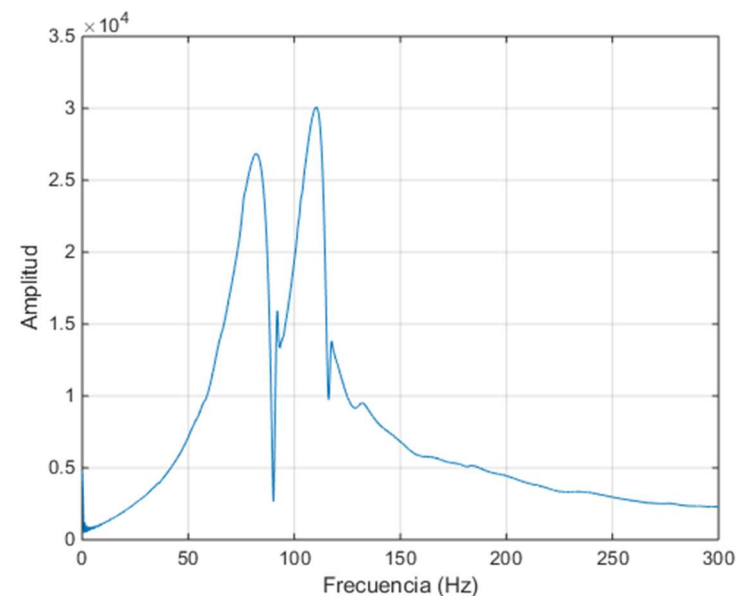
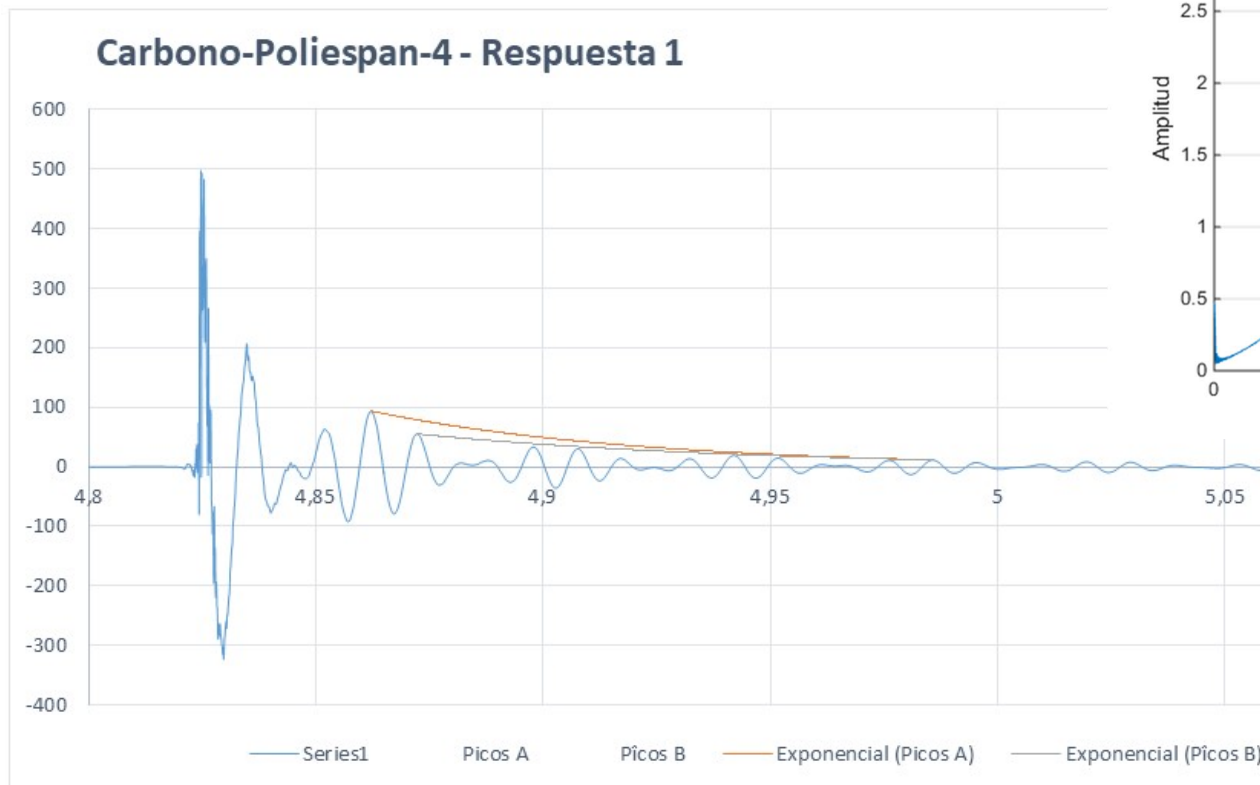
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	25,168848	112,591417
A8	25,262305	12,893376
δ	0,27088147	
ξ	0,04307212	
B1	25,179102	57,957642
B7	25,262305	12,893376
δ	0,21471411	
ξ	0,03415288	



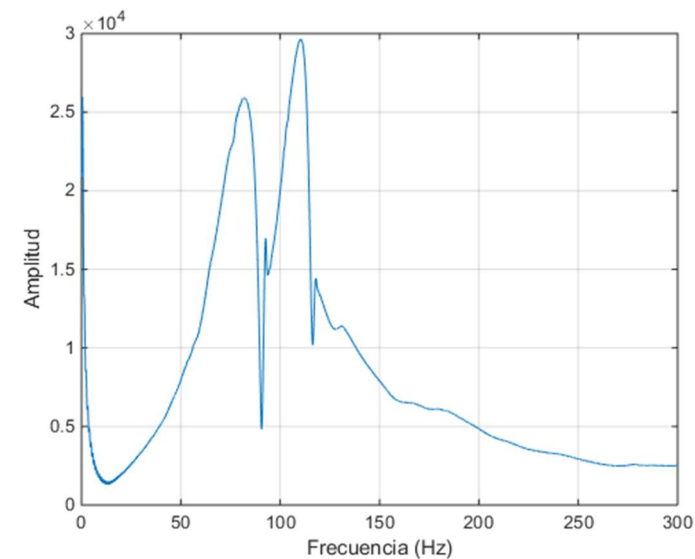
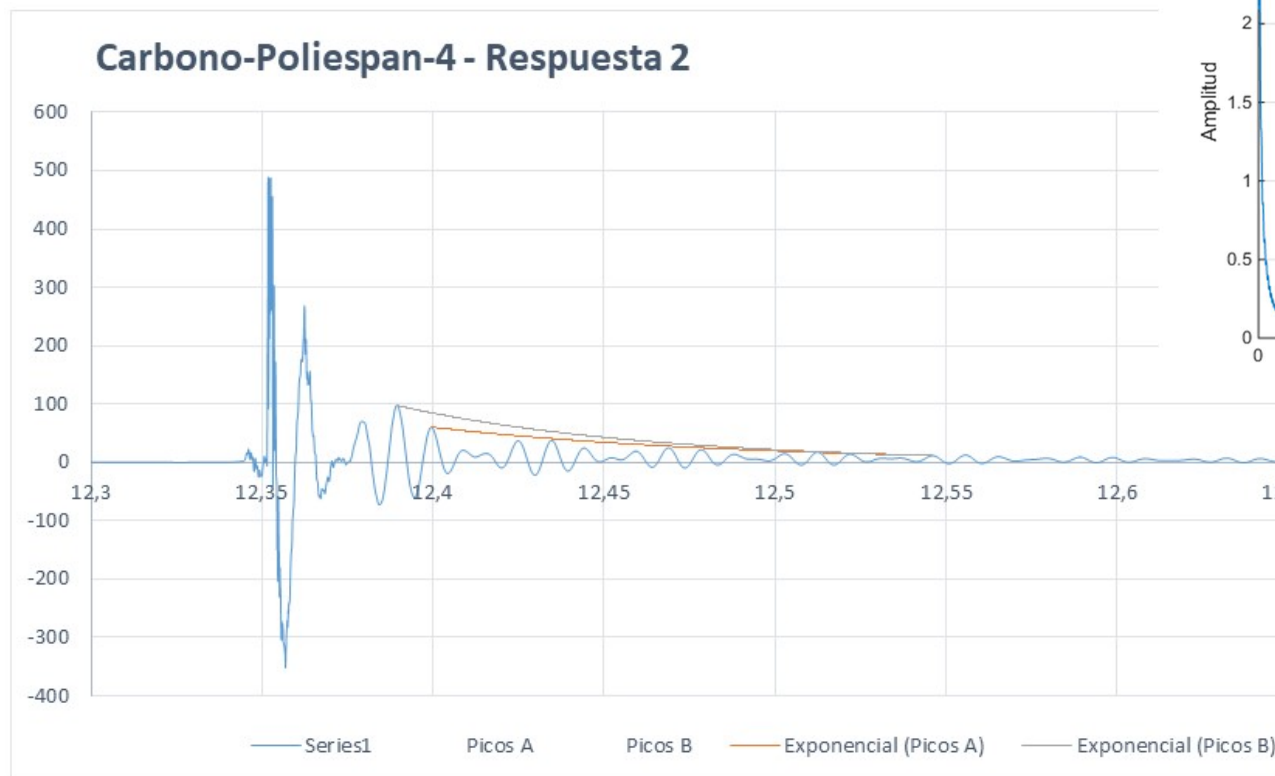
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	32,822461	60,541987
A12	32,958203	6,697666
δ	0,18346483	
ξ	0,0291869	
B1	32,8125	120,356983
B13	32,958203	6,697666
δ	0,22220793	
ξ	0,03534339	



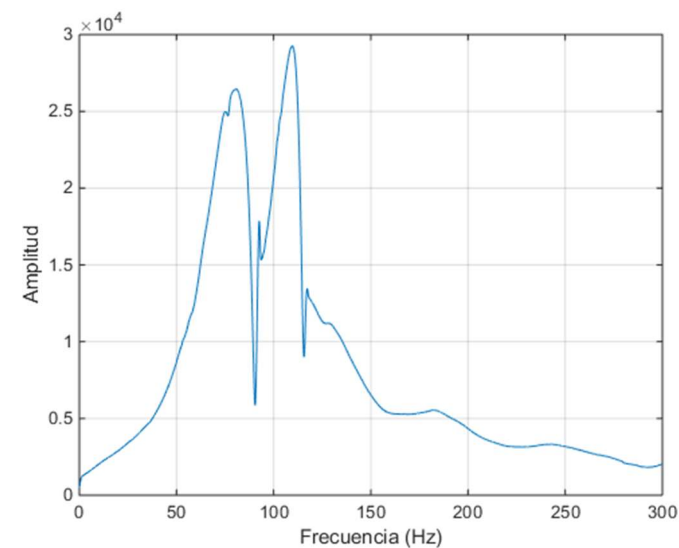
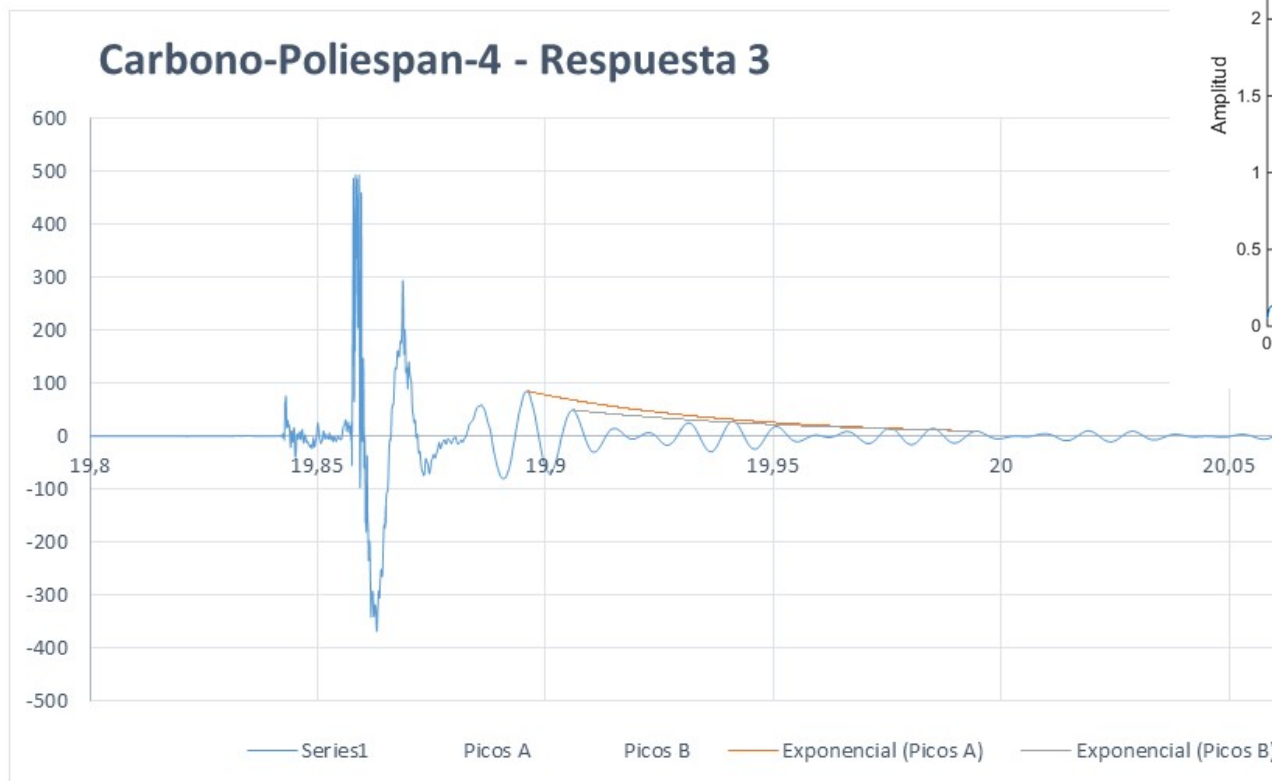
Channels	1
Samples	435200
Date	26/03/2018
Time	20:00:11
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	19:41,8
Delta_X	9,77E-05



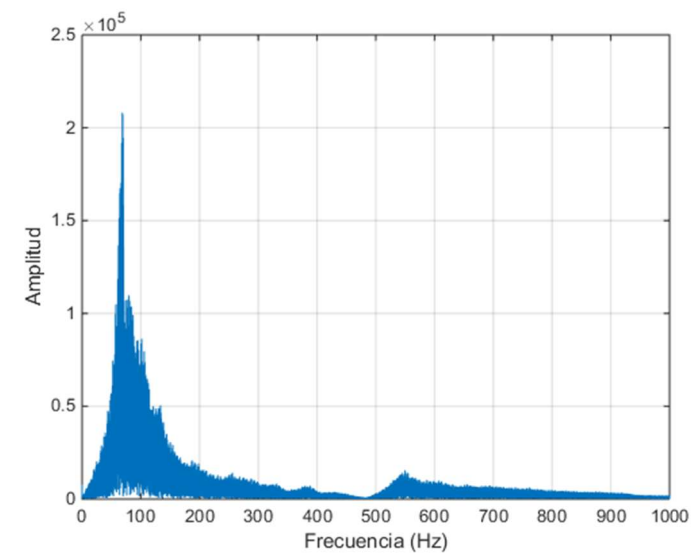
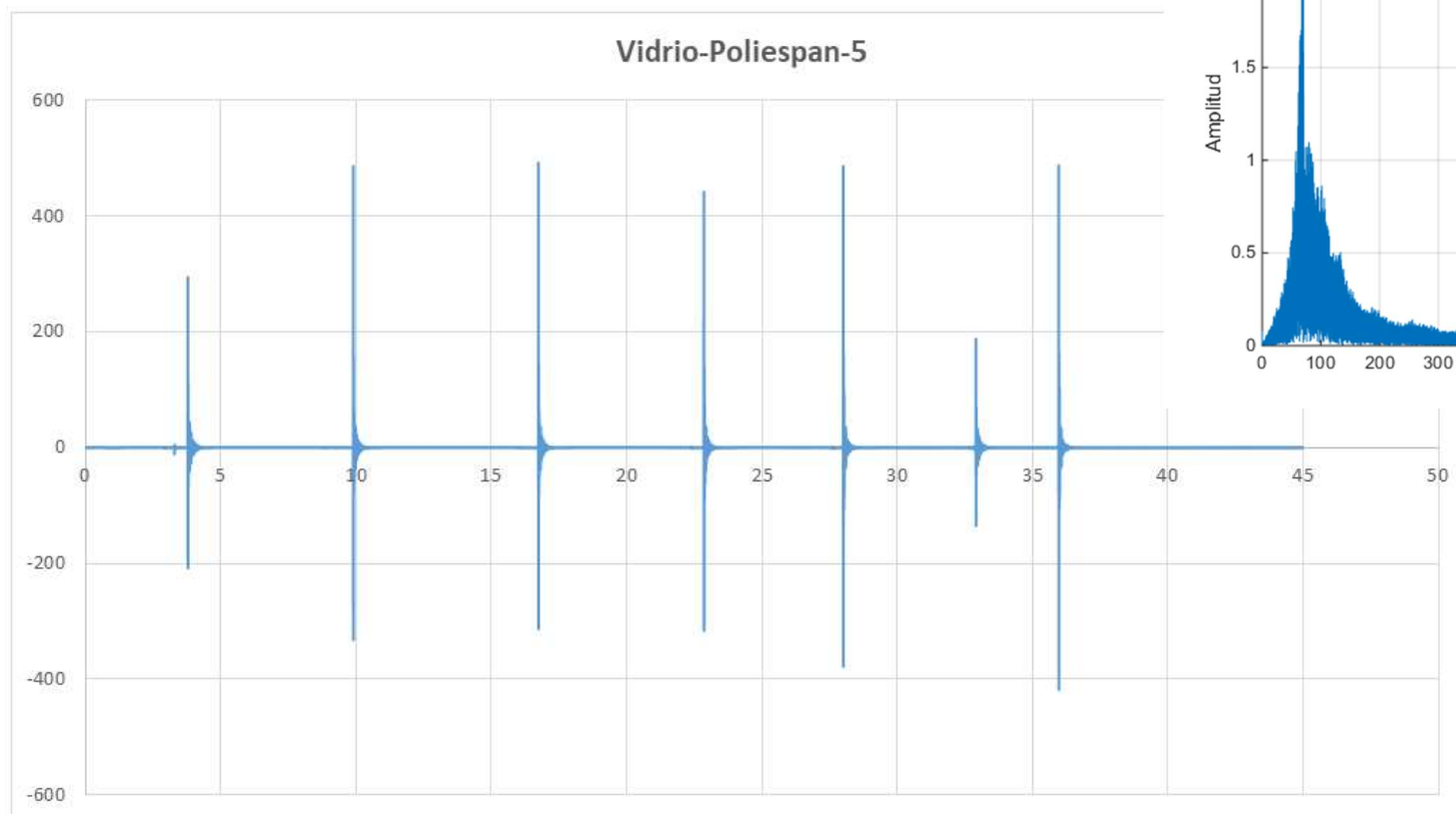
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	4,862109	93,606428
A11	4,985742	11,427016
δ	0,19119261	
ξ	0,03041517	
B1	4,872266	55,138979
B10	4,985742	11,427016
δ	0,15738765	
ξ	0,02504117	



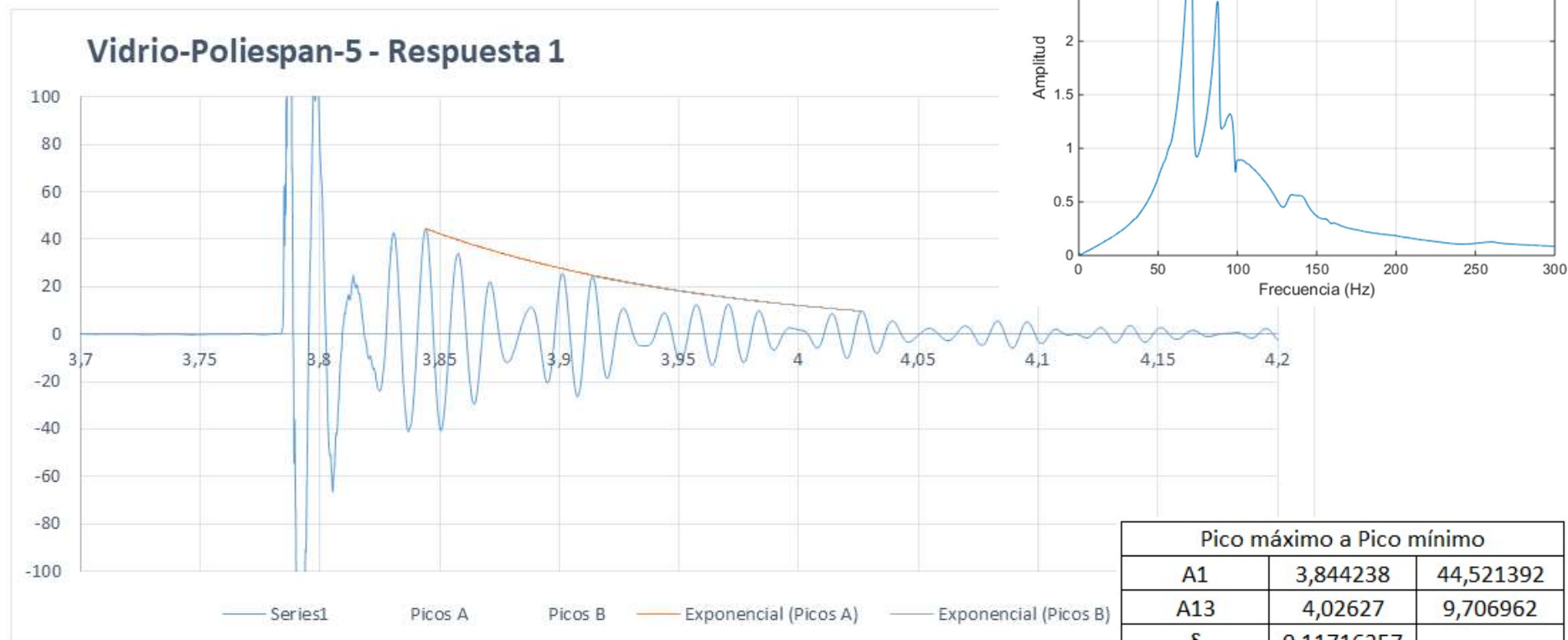
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	12,399512	60,347061
A13	12,545996	11,659652
δ	0,12645984	
ξ	0,02012263	
B1	12,389355	97,500494
B14	12,545996	11,659652
δ	0,15169451	
ξ	0,0241359	



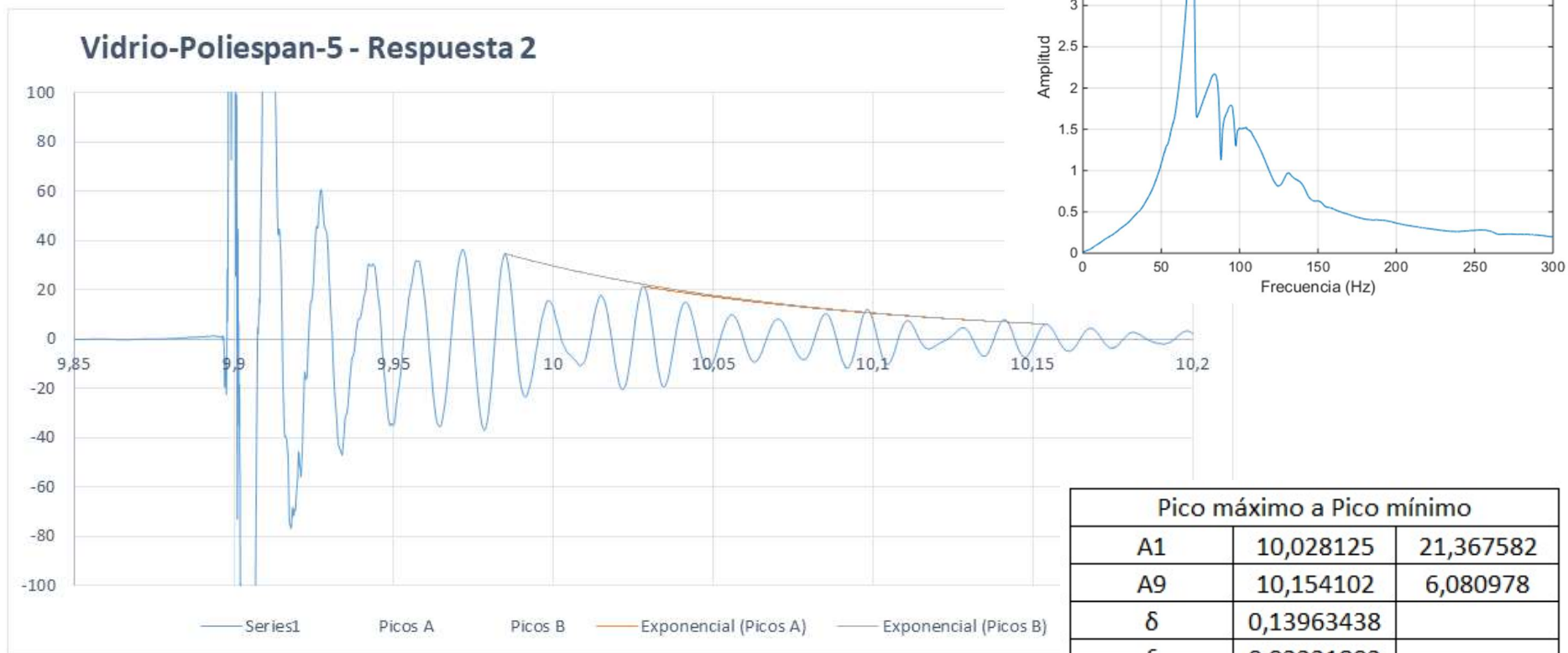
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	19,895996	85,421769
A11	19,994629	9,756332
δ	0,19724404	
ξ	0,03137691	
B1	19,905859	49,628761
B10	19,994629	9,756332
δ	0,1626654	
ξ	0,02588033	



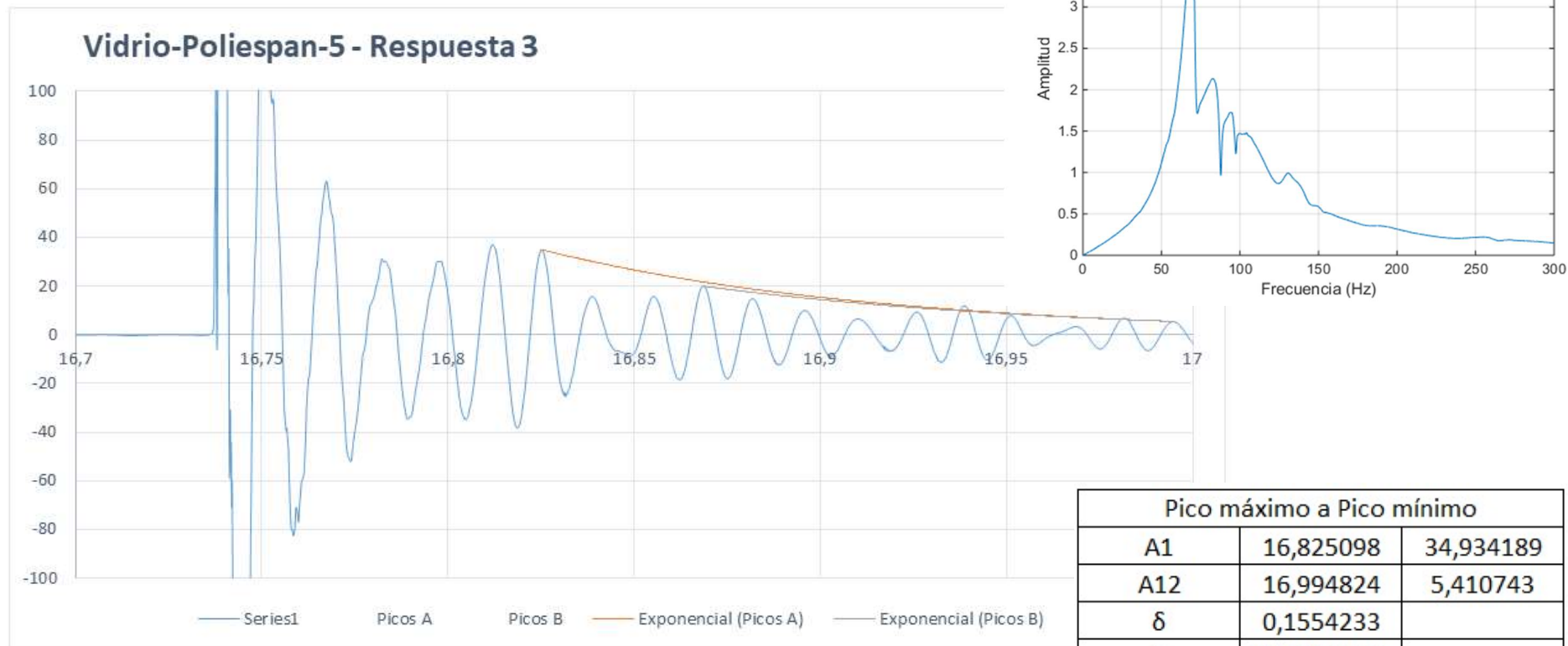
Channels	1
Samples	460800
Date	26/03/2018
Time	19:59:40
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	19:44,7
Delta_X	9,77E-05



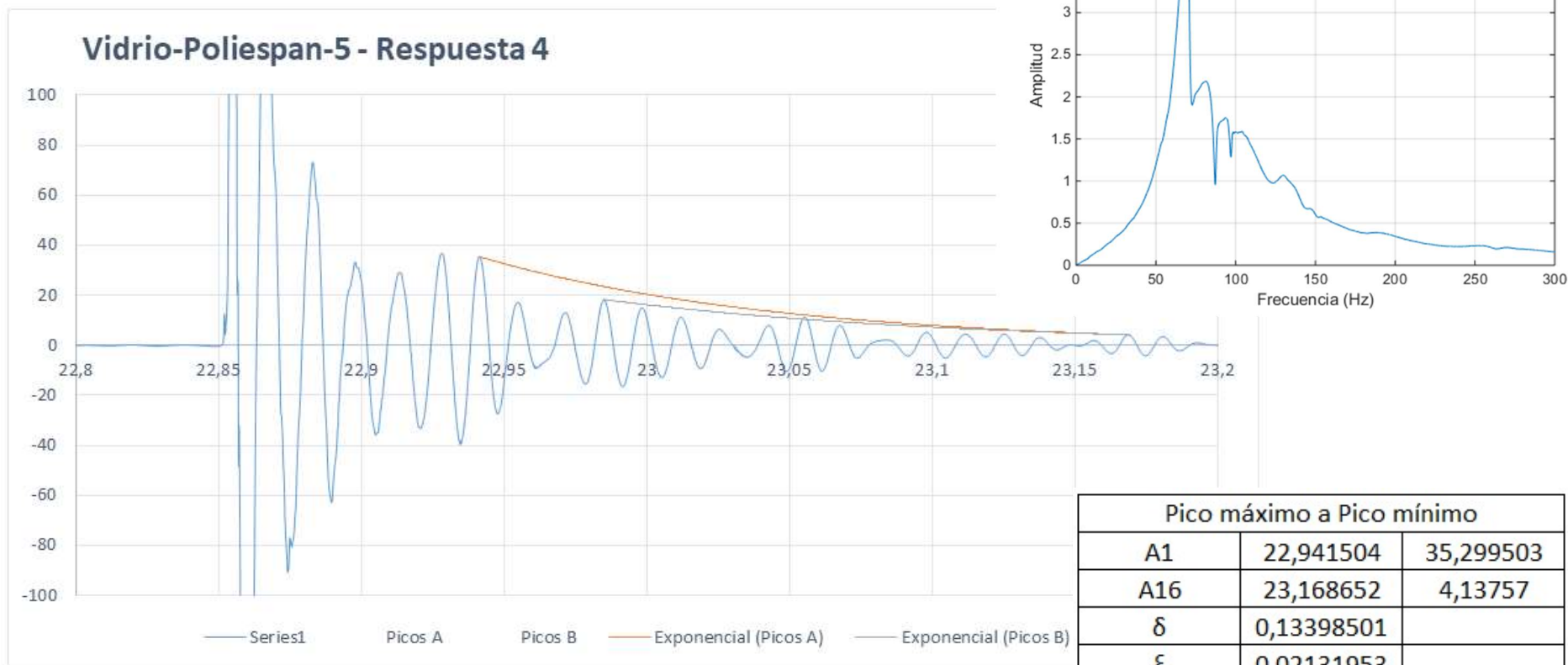
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	3,844238	44,521392
A13	4,02627	9,706962
δ	0,11716357	
ξ	0,01864392	
B1	3,913867	24,50155
B8	4,02627	9,706962
δ	0,11573663	
ξ	0,01841693	



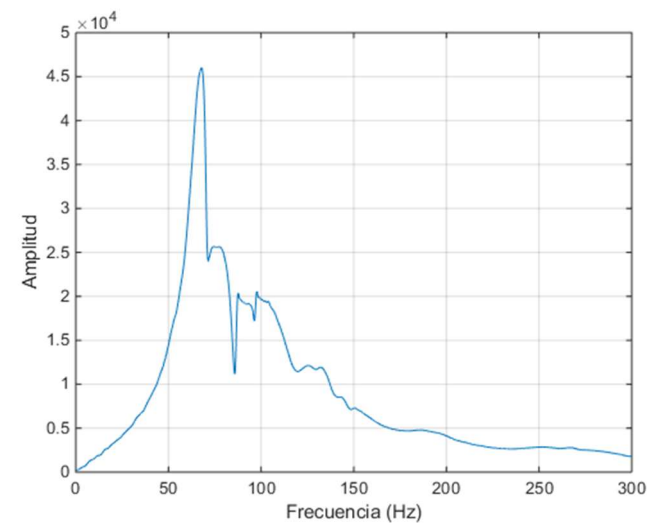
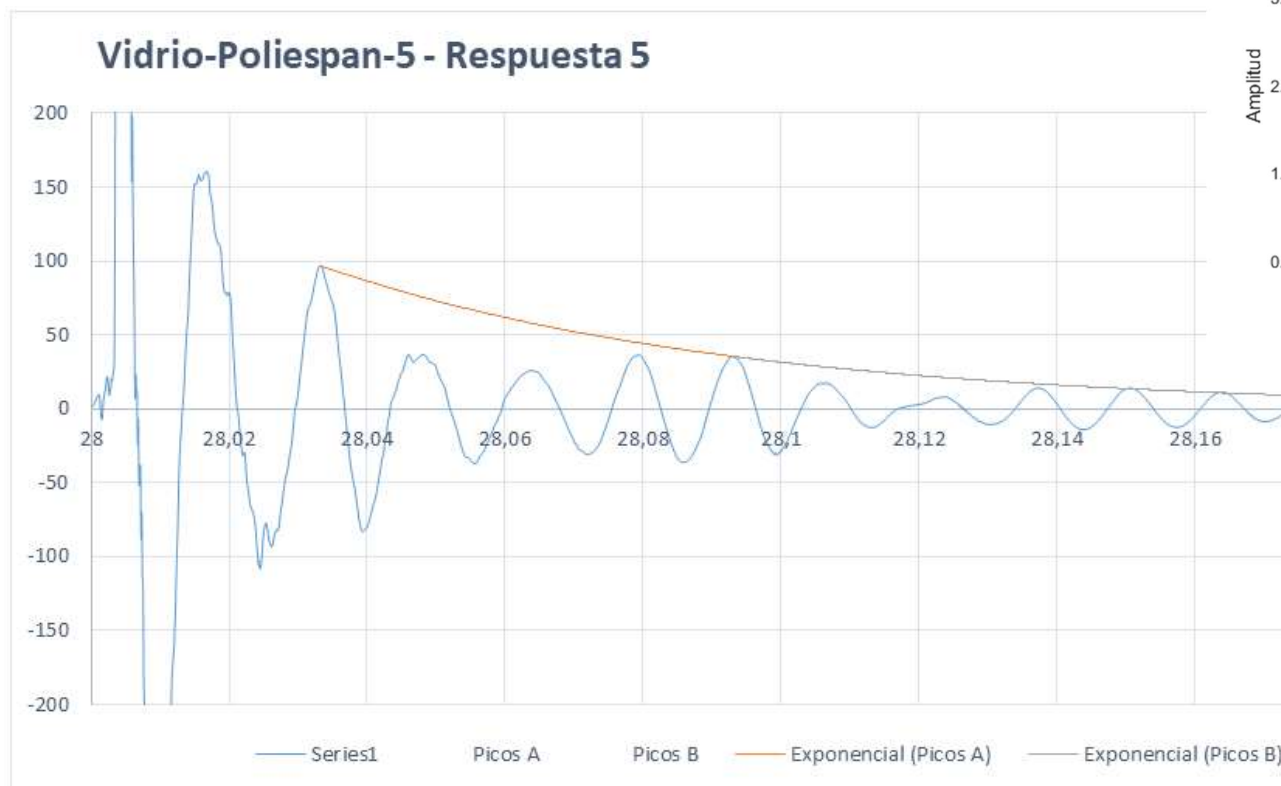
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	10,028125	21,367582
A9	10,154102	6,080978
δ	0,13963438	
ξ	0,02221802	
B1	9,984766	34,705789
B12	10,154102	6,080978
δ	0,14514508	
ξ	0,0230944	



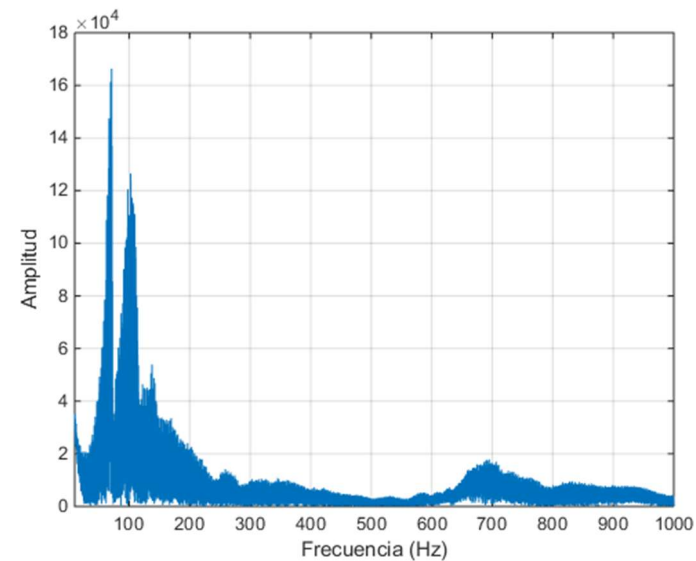
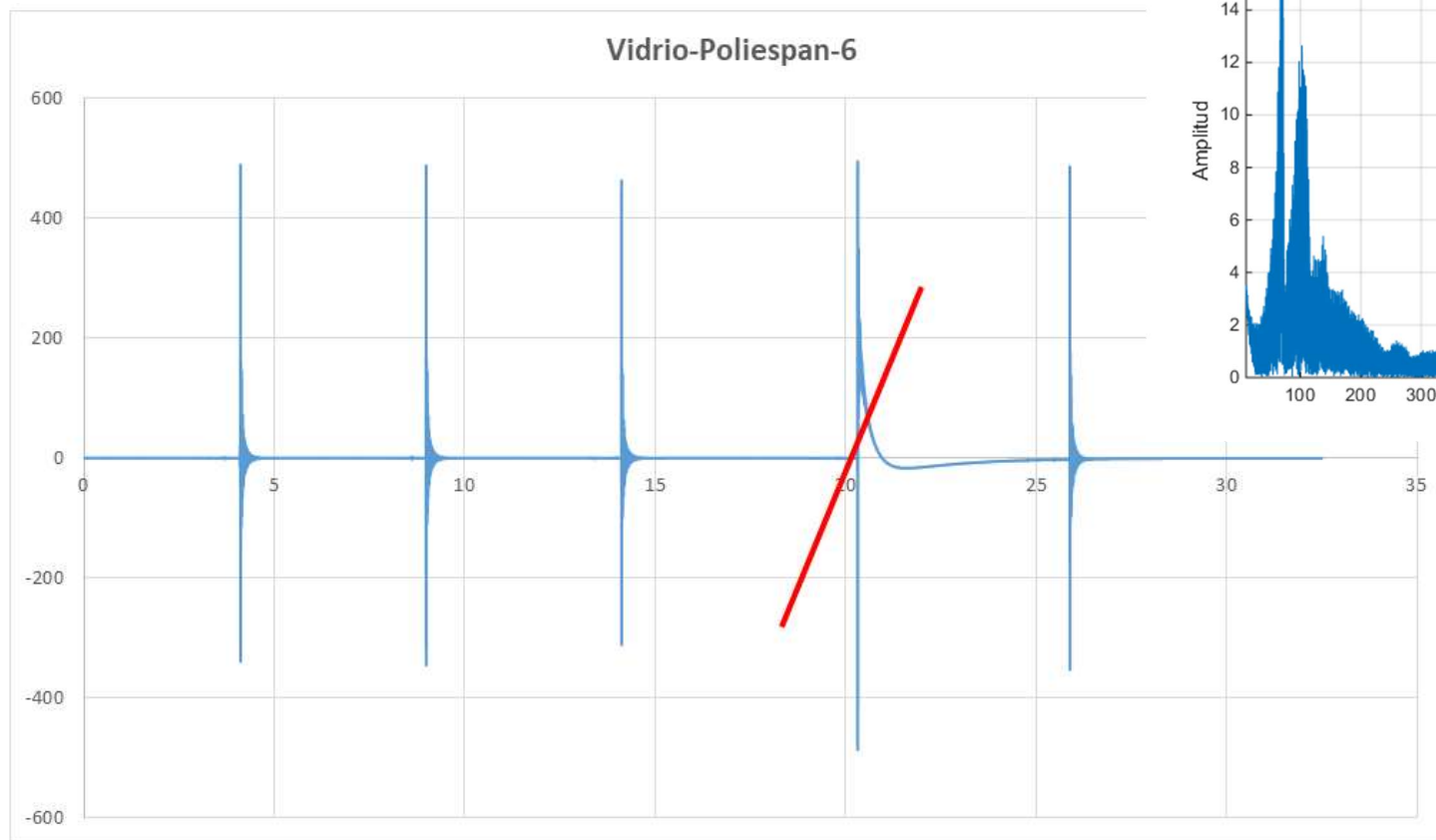
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	16,825098	34,934189
A12	16,994824	5,410743
δ	0,1554233	
ξ	0,02472882	
B1	16,868555	19,923848
B9	16,994824	5,410743
δ	0,14483678	
ξ	0,02304537	



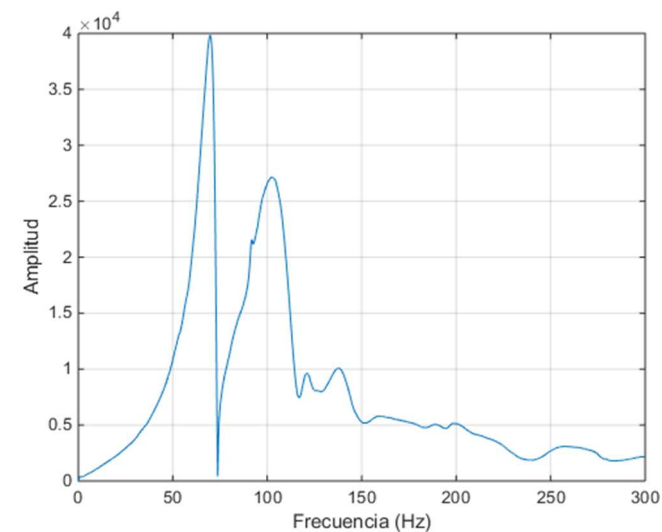
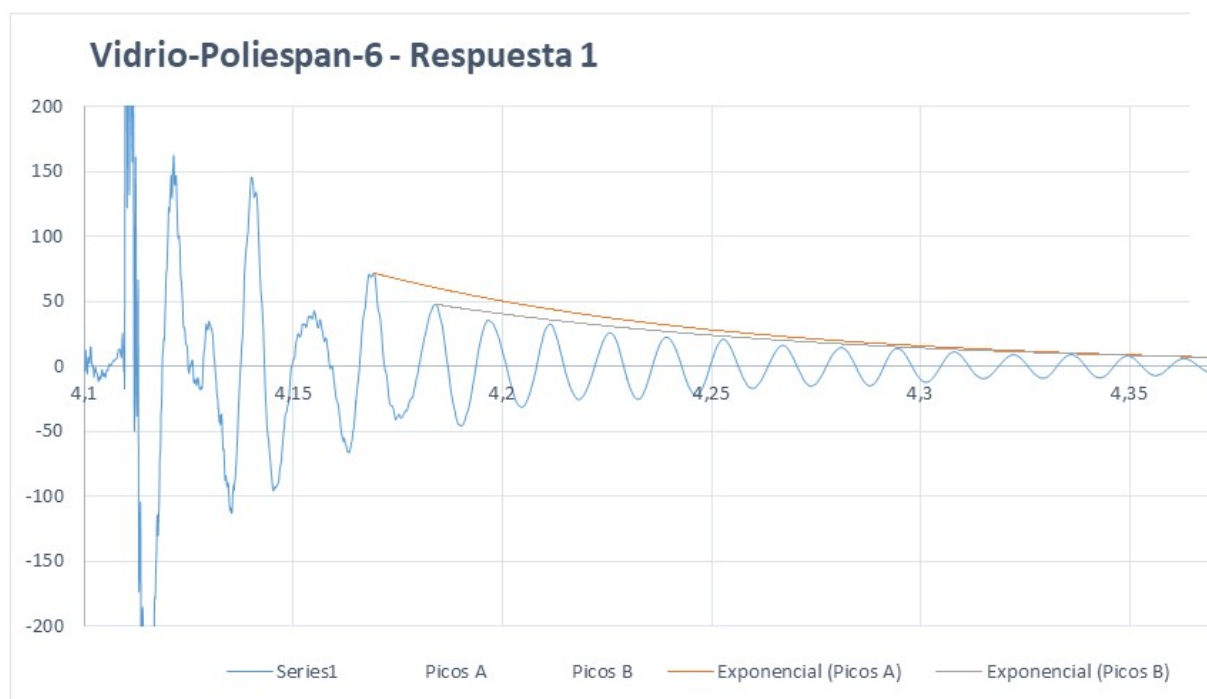
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	22,941504	35,299503
A16	23,168652	4,13757
δ	0,13398501	
ξ	0,02131953	
B1	22,984961	18,237442
B13	23,168652	4,13757
δ	0,11410524	
ξ	0,01815742	



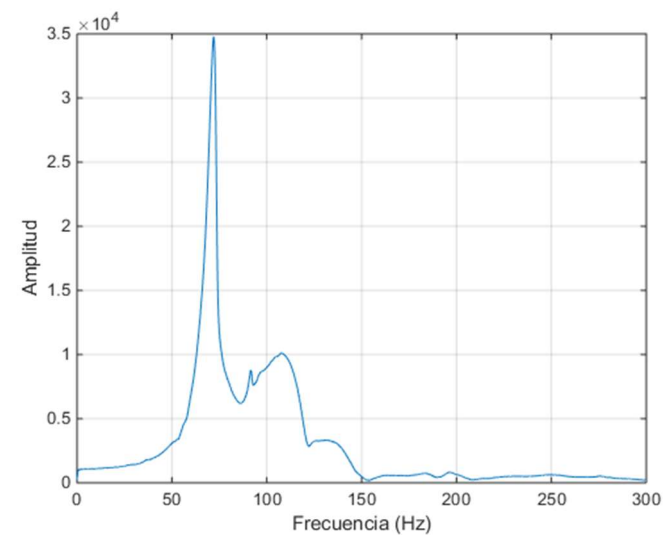
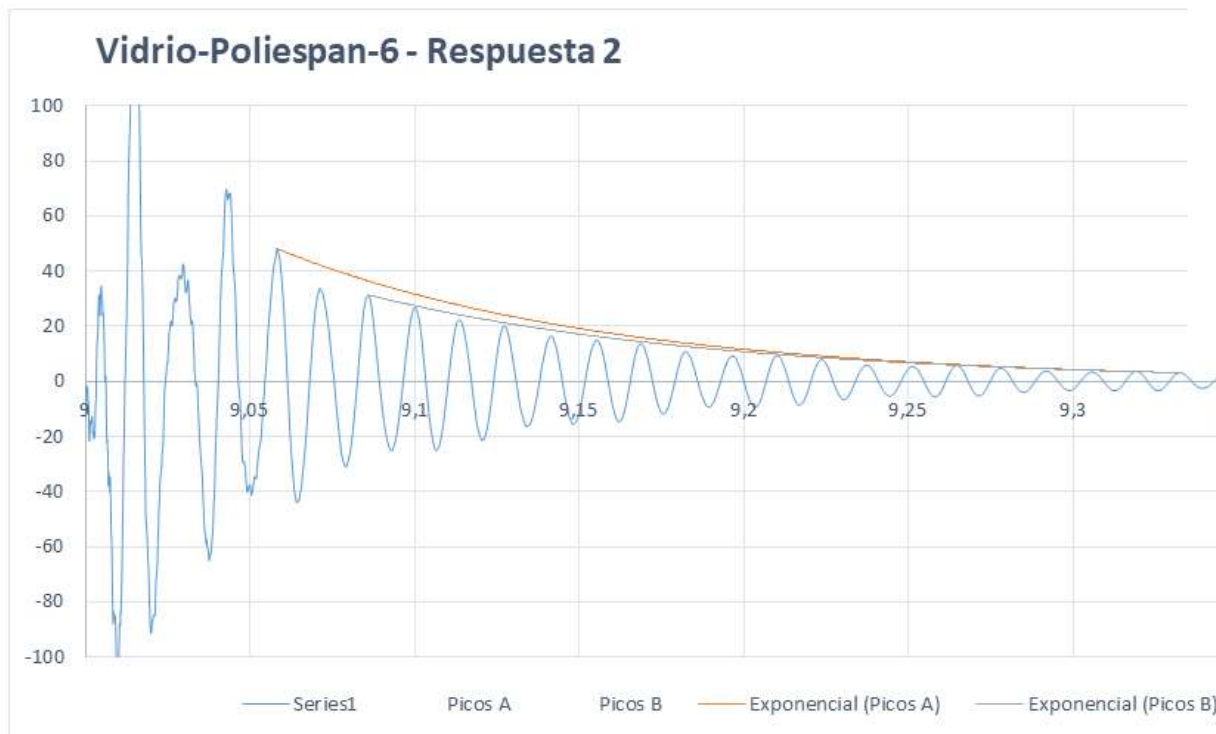
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	28,033203	96,842791
A11	28,195215	6,371685
δ	0,24738409	
ξ	0,03934192	
B1	28,092871	35,416227
B7	28,195215	6,371685
δ	0,24504374	
ξ	0,0389703	



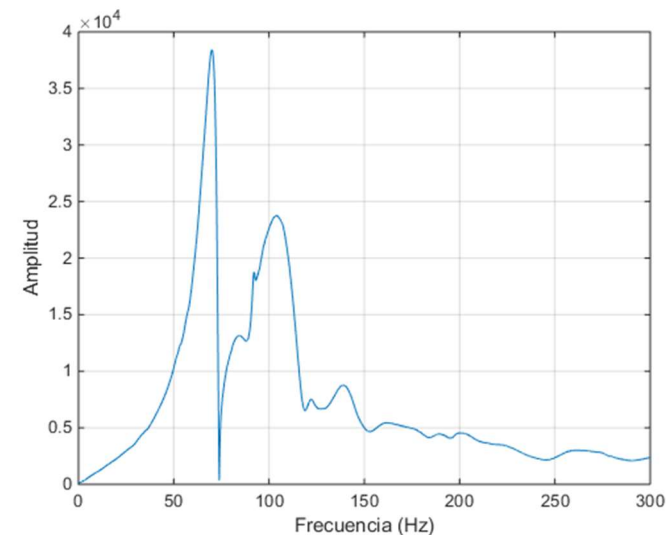
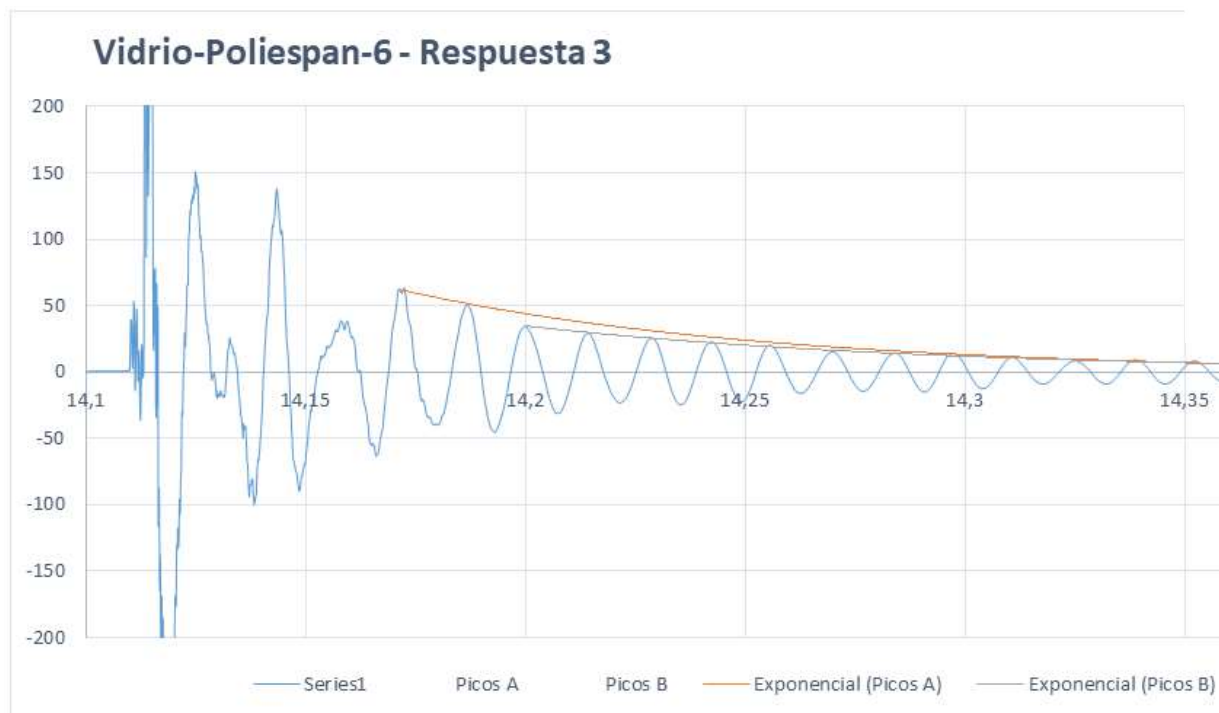
Channels	1
Samples	332800
Date	26/03/2018
Time	19:57:16
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	19:48,8
Delta_X	9,77E-05



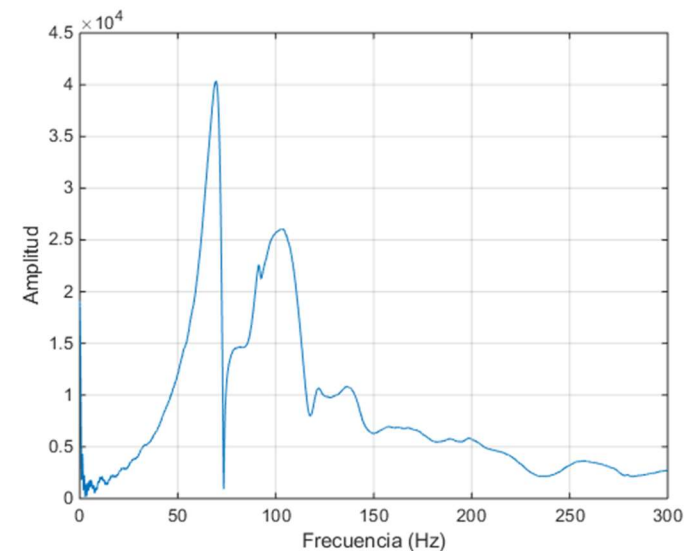
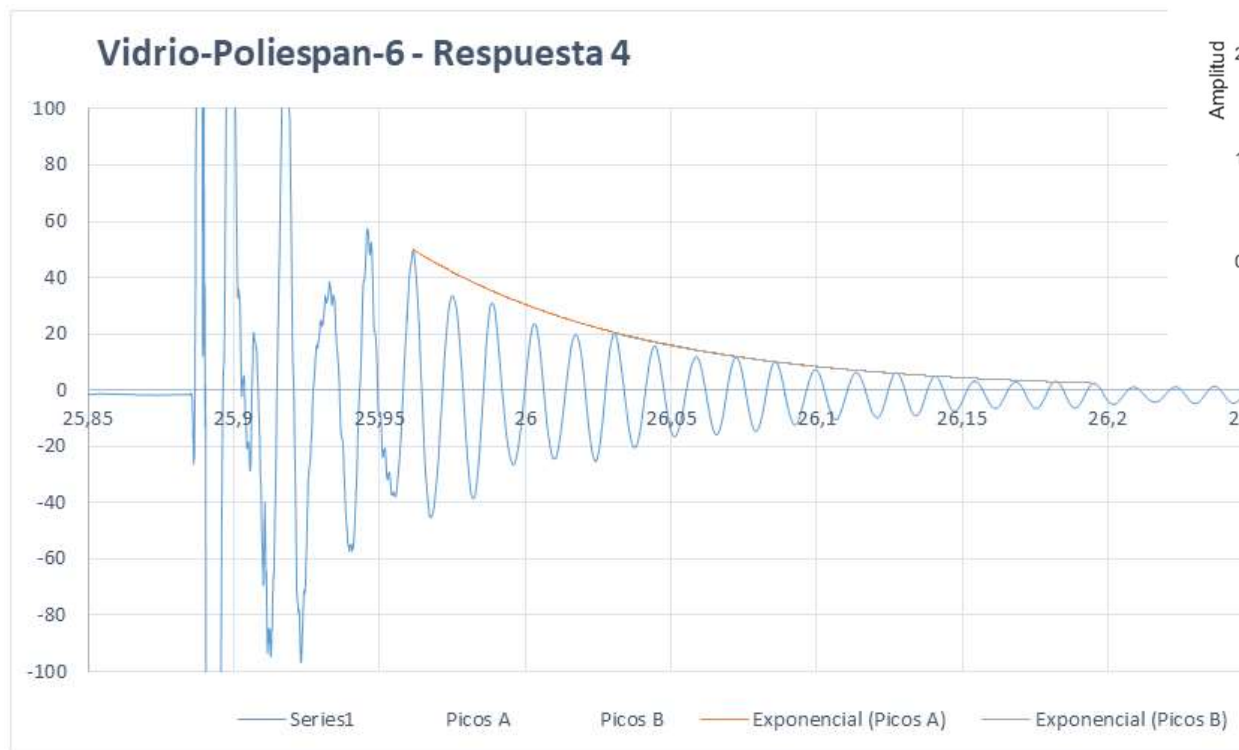
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	4,169336	71,898092
A16	4,39082	5,465856
δ	0,16104556	
ξ	0,02562278	
B1	4,184082	47,754448
B15	4,39082	5,465856
δ	0,14450343	
ξ	0,02299236	



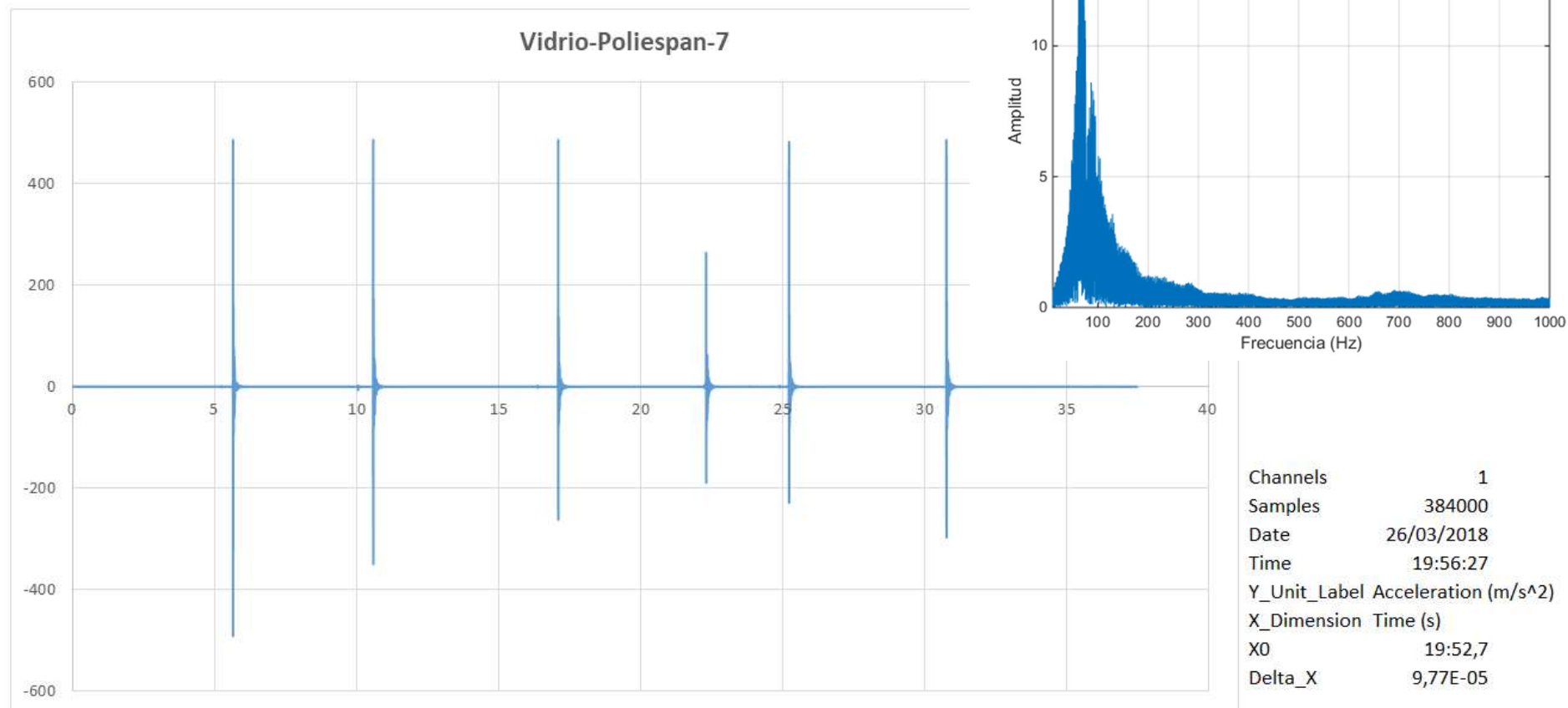
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	9,058203	48,127536
A20	9,332617	3,079165
δ	0,1374598	
ξ	0,02187217	
B1	9,085937	31,336864
B18	9,332617	3,079165
δ	0,12889648	
ξ	0,0205102	

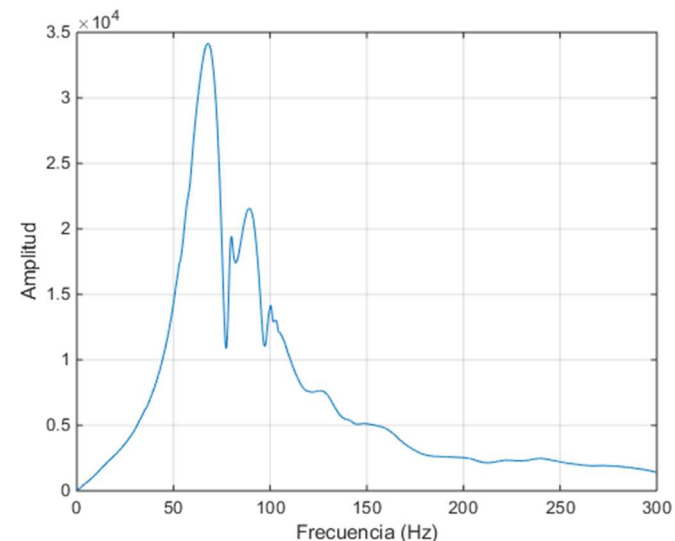


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	14,171191	62,198342
A15	14,379687	4,961078
δ	0,16858035	
ξ	0,02682074	
B1	14,2	34,691691
B13	14,379687	4,961078
δ	0,14960593	
ξ	0,02380378	

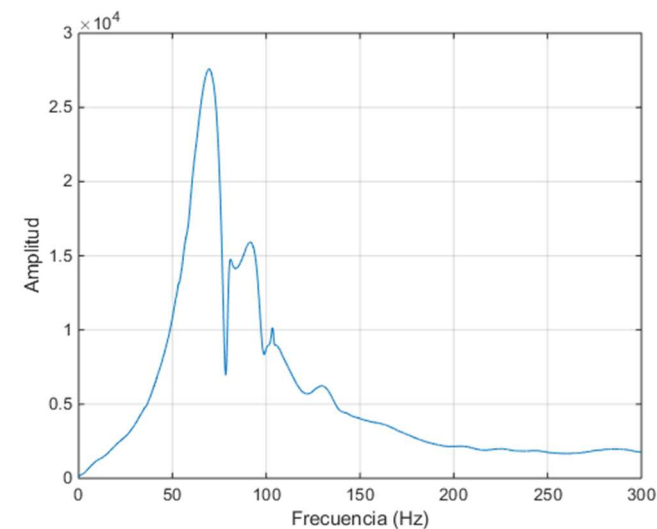
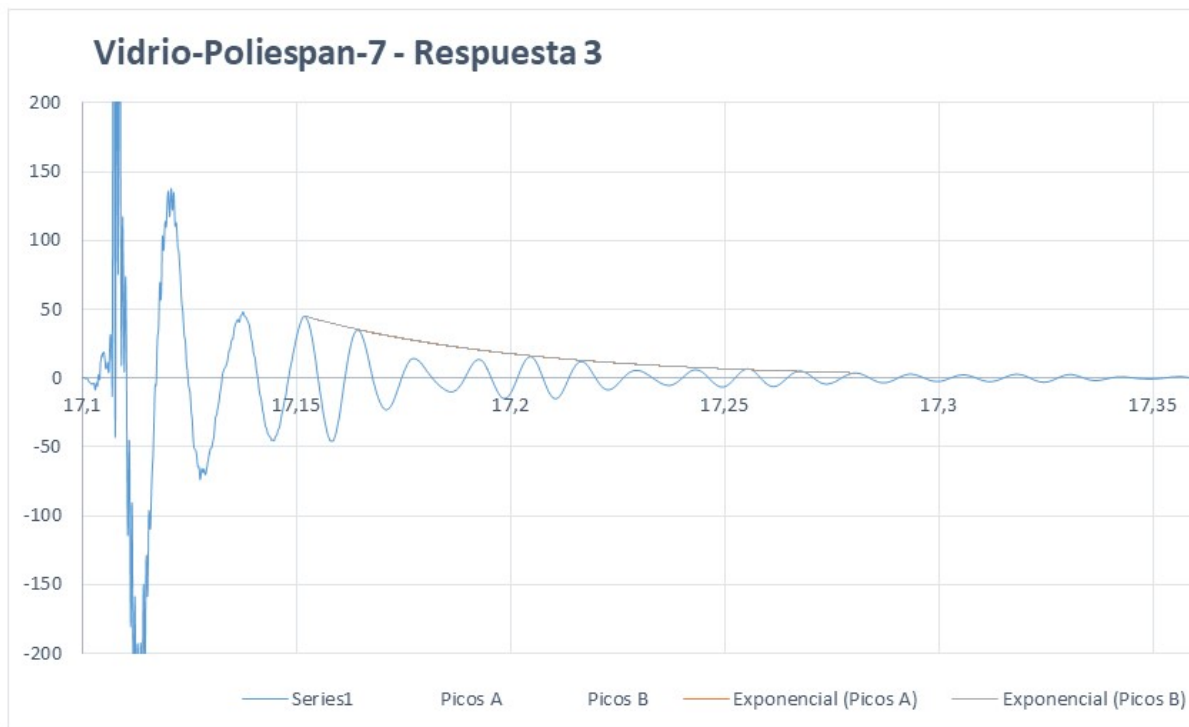


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	25,961523	49,957526
A17	26,195117	2,472049
δ	0,17683093	
ξ	0,02813238	
B1	26,030566	20,227841
B12	26,195117	2,472049
δ	0,17516771	
ξ	0,02786798	

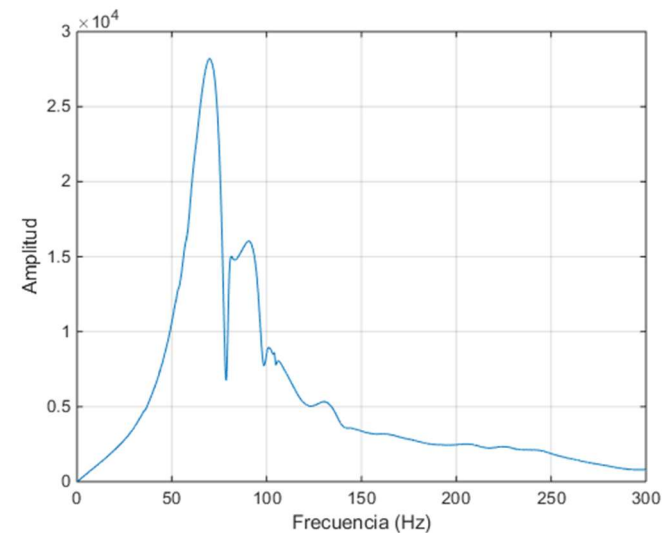
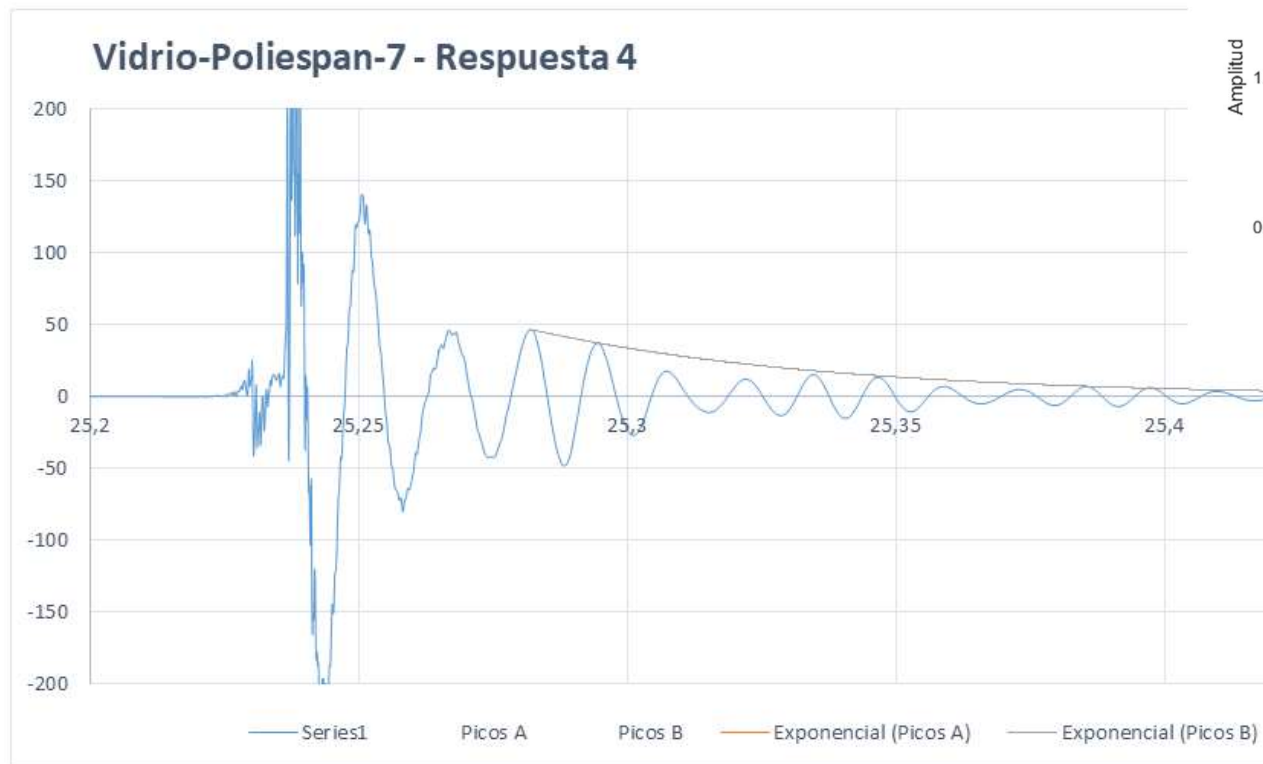




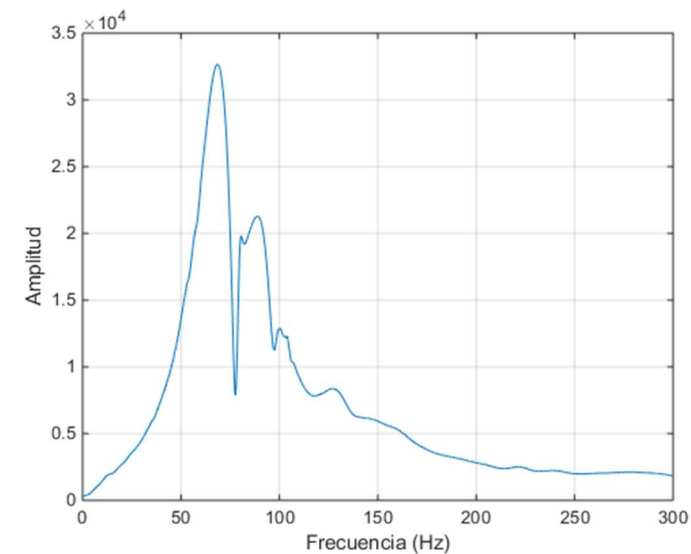
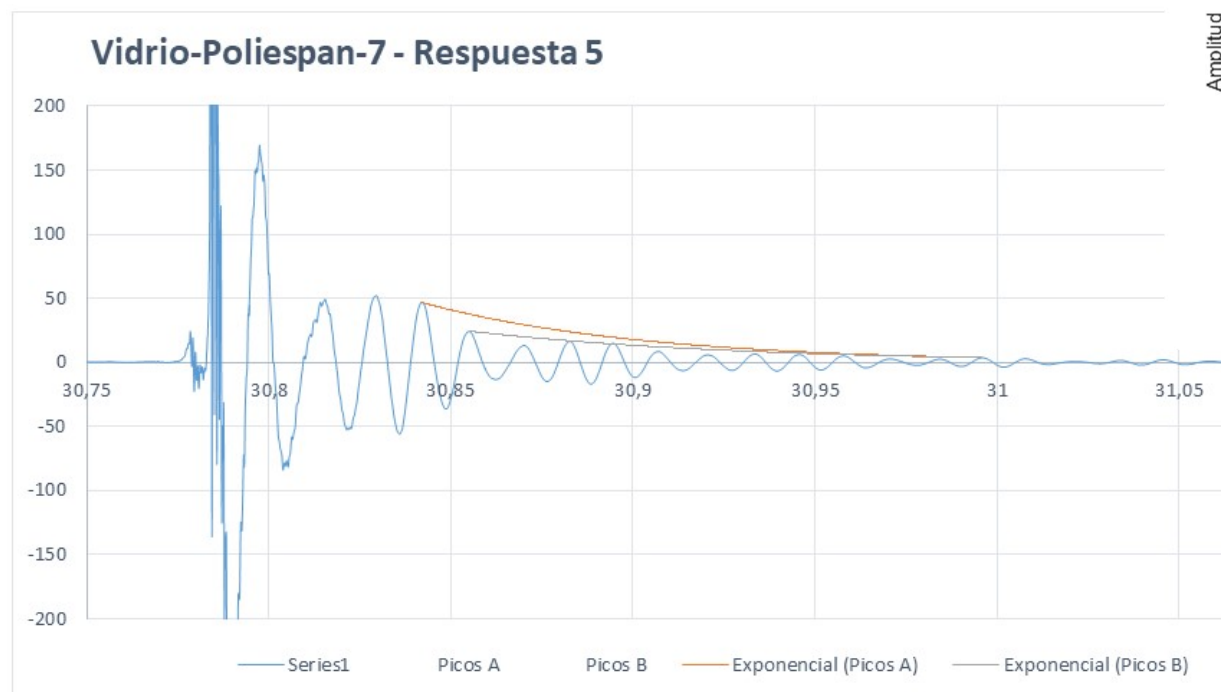
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	10,651953	42,153613
A10	10,78291	3,32729
δ	0,25391622	
ξ	0,04037906	
B1	10,639258	53,953639
B11	10,78291	3,32729
δ	0,25326973	
ξ	0,04027642	



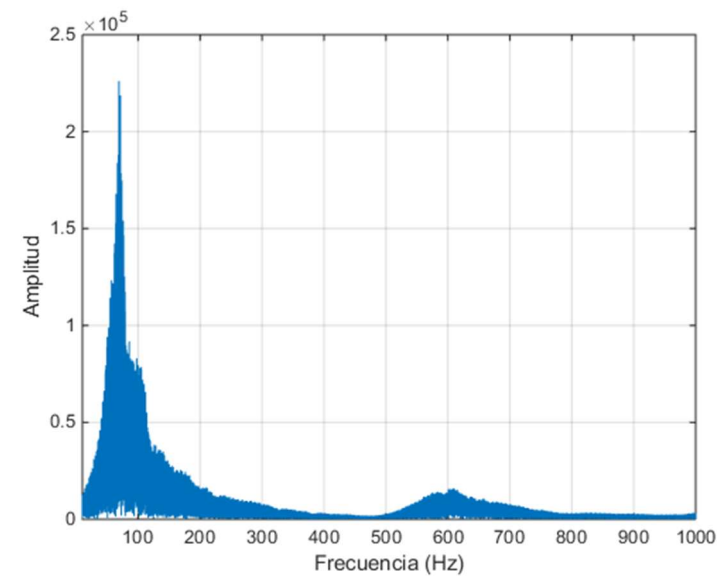
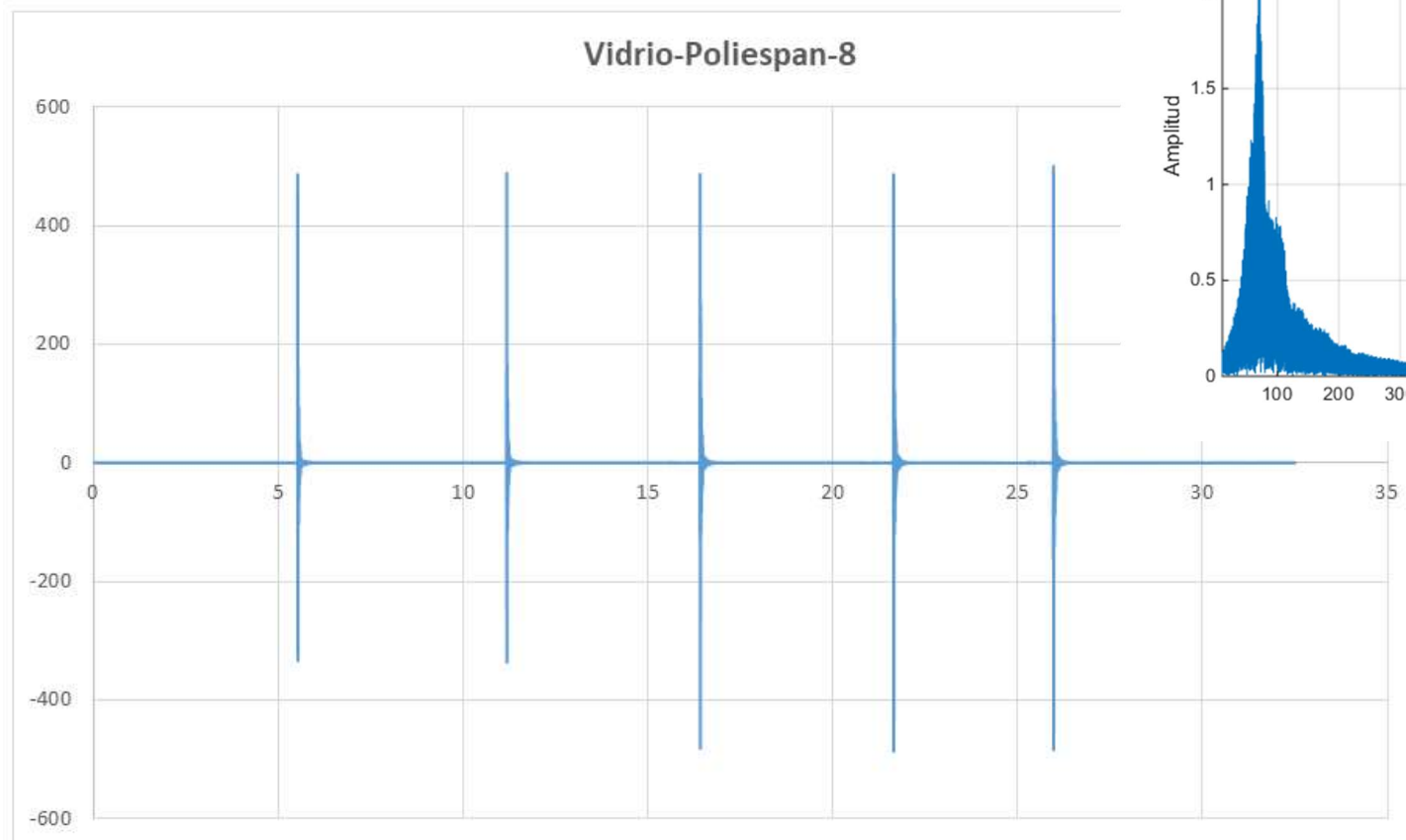
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	17,164355	35,119254
A9	17,280469	3,749167
δ	0,24857954	
ξ	0,03953174	
B1	17,152051	44,918149
B10	17,280469	3,749167
δ	0,24833082	
ξ	0,03949225	



Pico máximo a Pico mínimo		
A1	25,294531	37,300982
A11	25,435449	2,862135
δ	0,23340471	
ξ	0,03712191	
B1	25,282129	46,694244
B12	25,435449	2,862135
δ	0,23267109	
ξ	0,03700539	

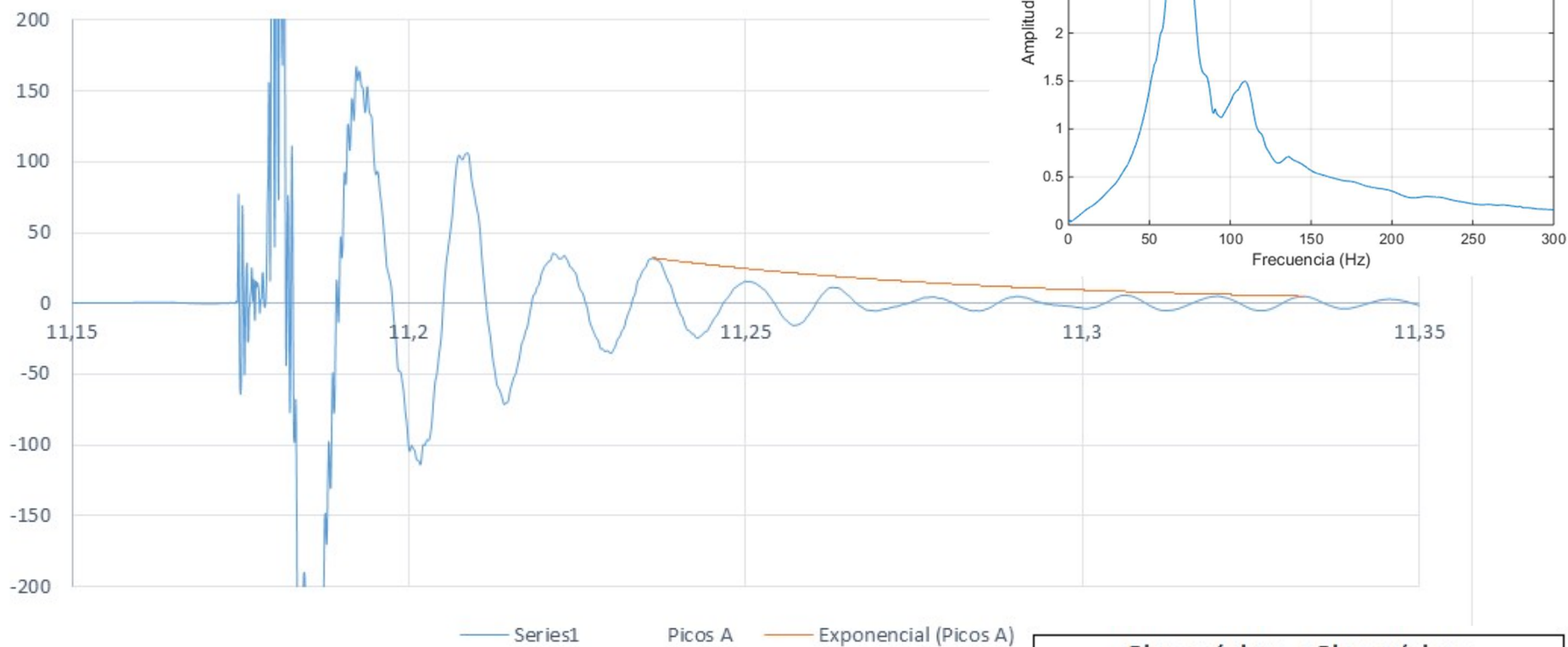


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	30,841895	46,826574
A12	30,995898	3,647527
δ	0,21270012	
ξ	0,0338329	
B1	30,855176	24,363245
B11	30,995898	3,647527
δ	0,17263875	
ξ	0,02746594	

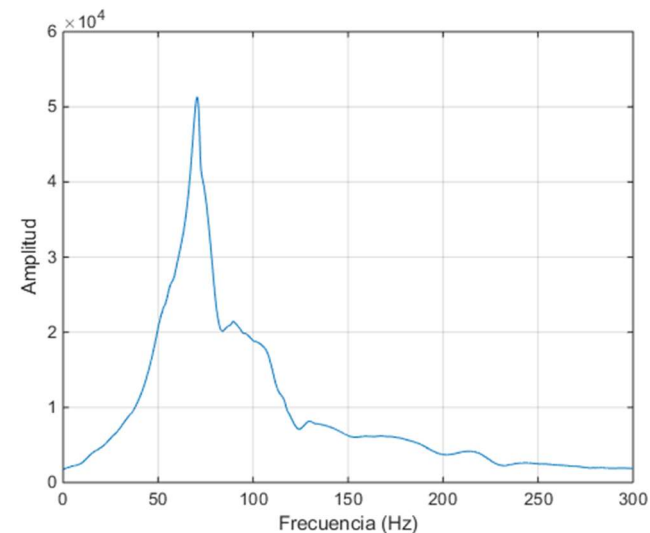
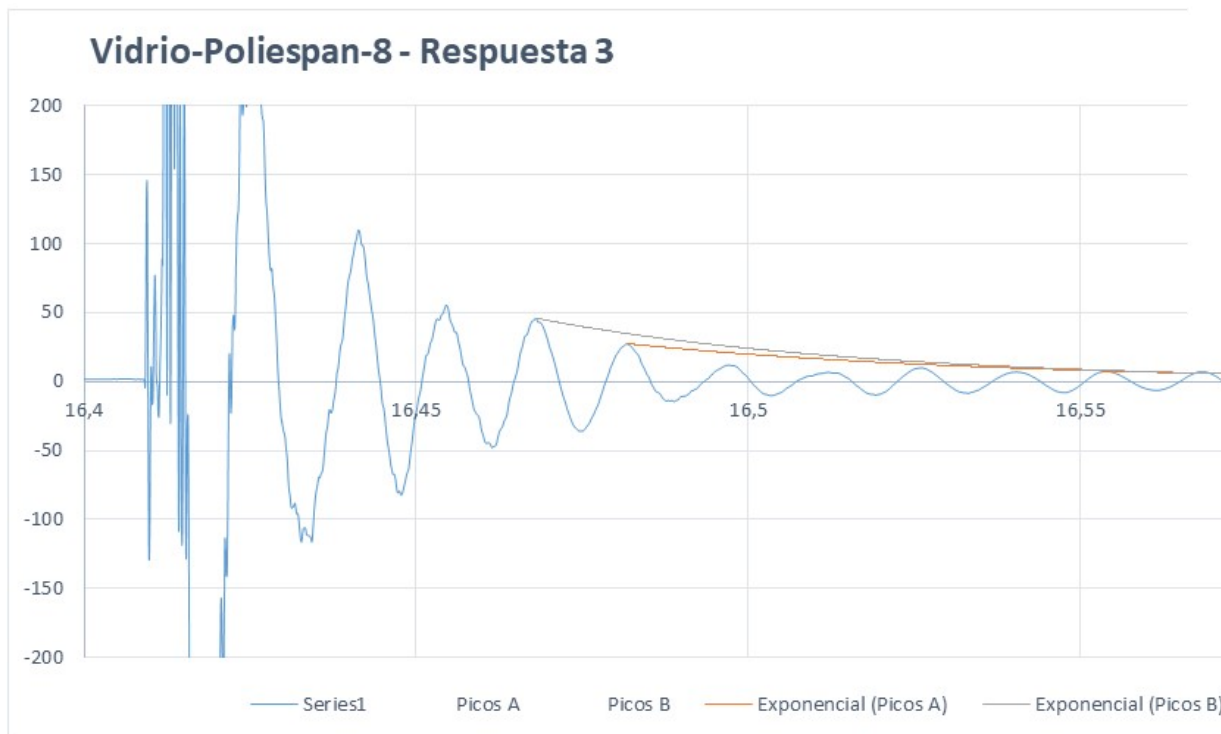


Channels	1
Samples	332800
Date	26/03/2018
Time	19:55:53
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	19:54,3
Delta_X	9,77E-05

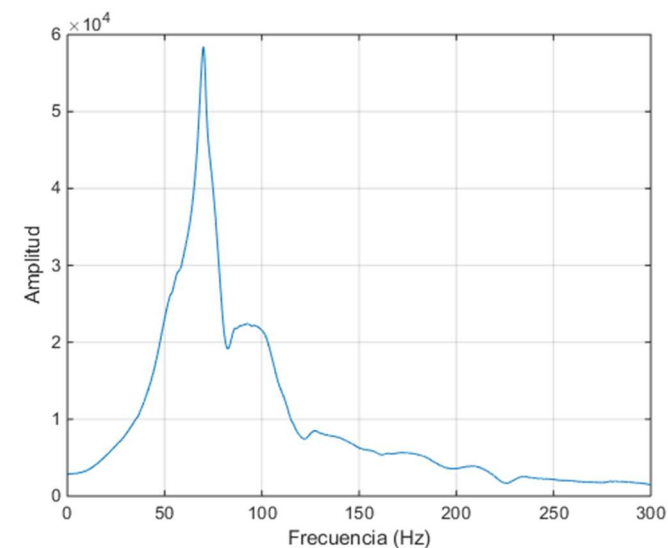
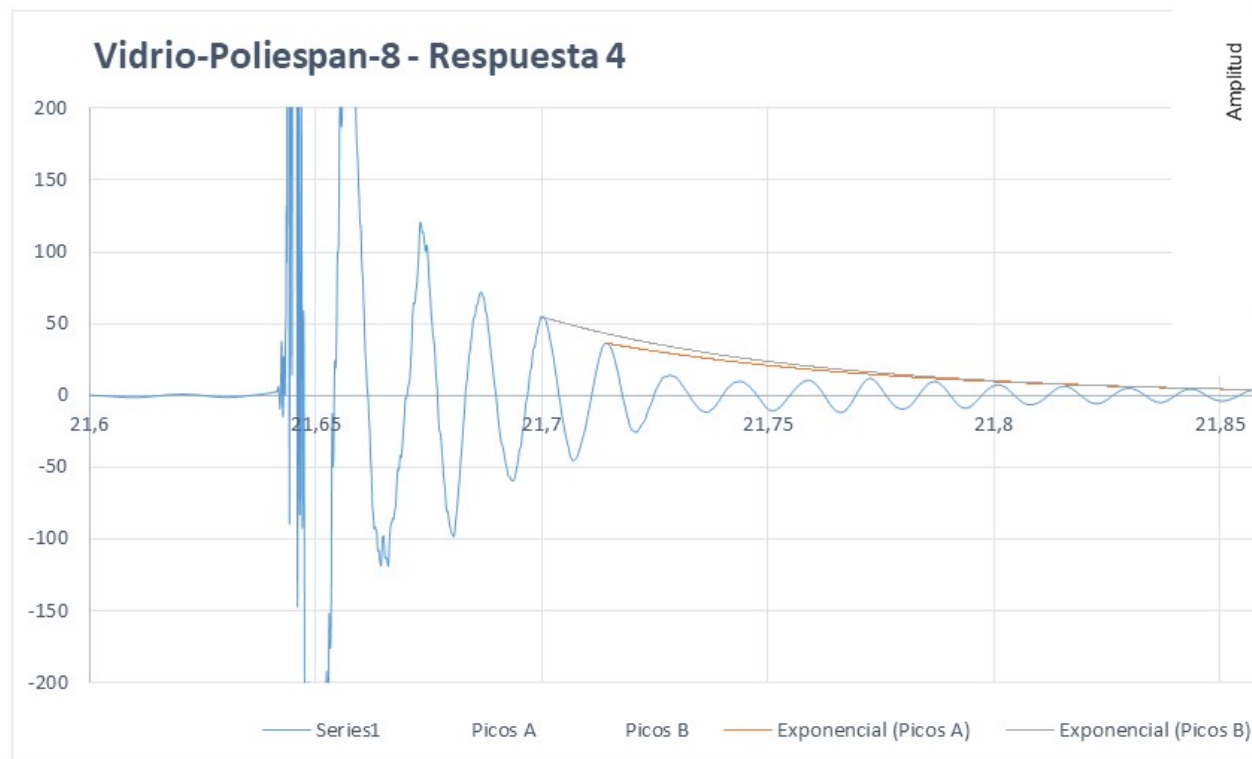
Vidrio-Poliespan-8 - Respuesta 2



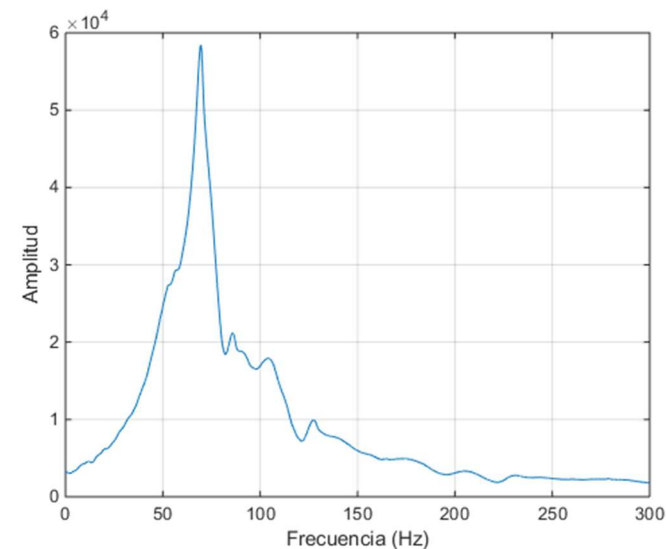
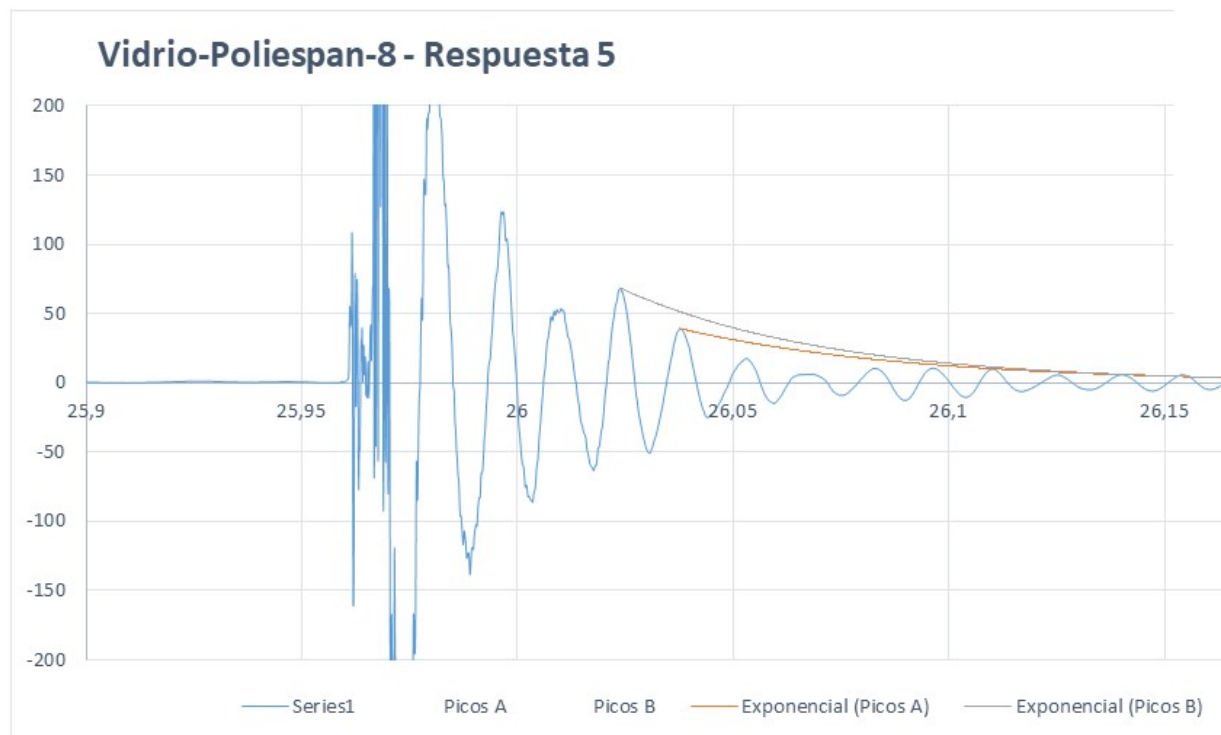
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	11,236133	32,072828
A7	11,332812	4,975755
δ	0,26620458	
ξ	0,0423298	



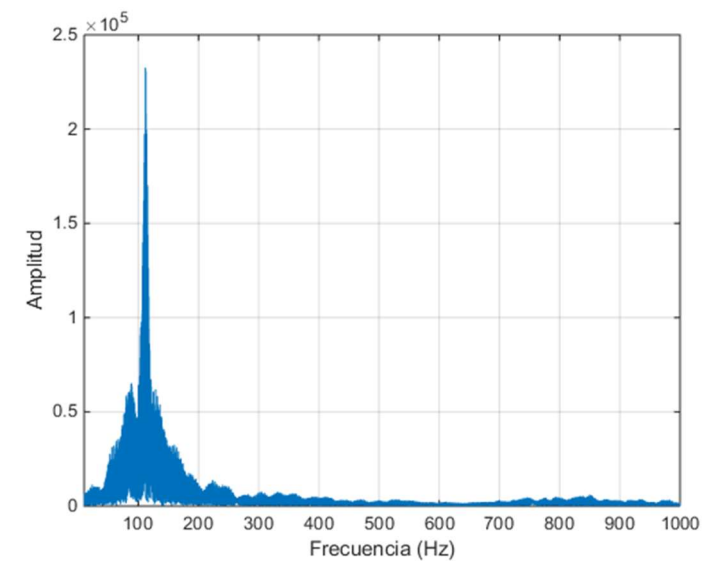
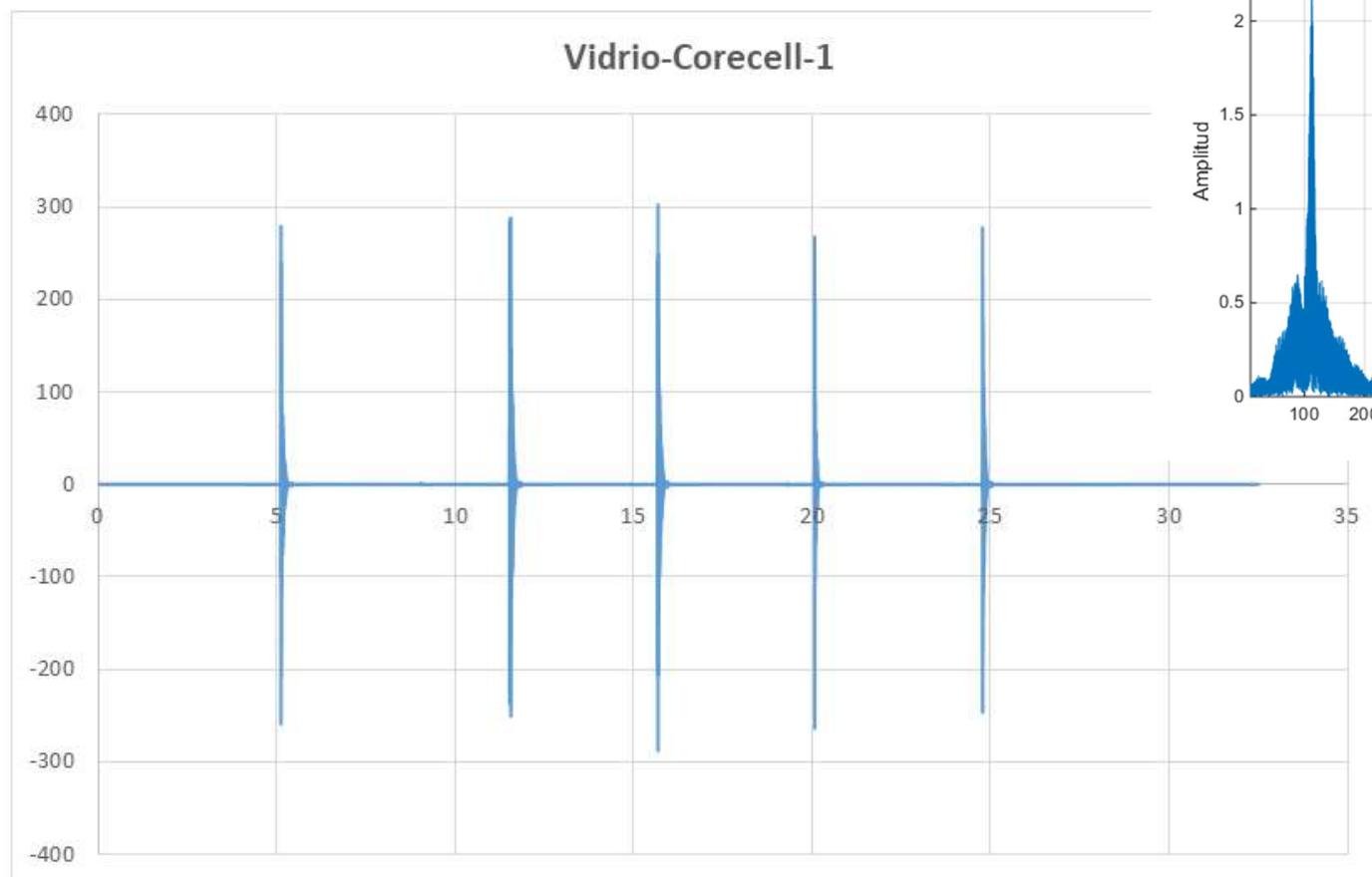
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	16,481738	27,46374
A7	16,582227	4,592283
δ	0,25549847	
ξ	0,04063027	
B1	16,467969	45,976844
B8	16,582227	4,592283
δ	0,28797007	
ξ	0,0457838	



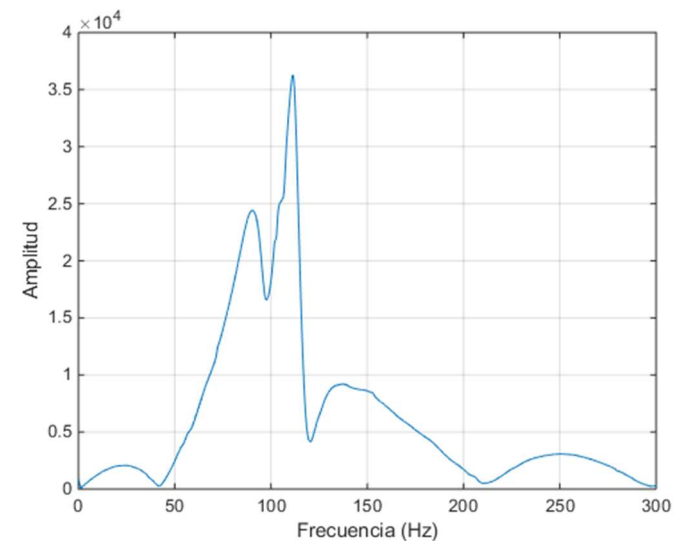
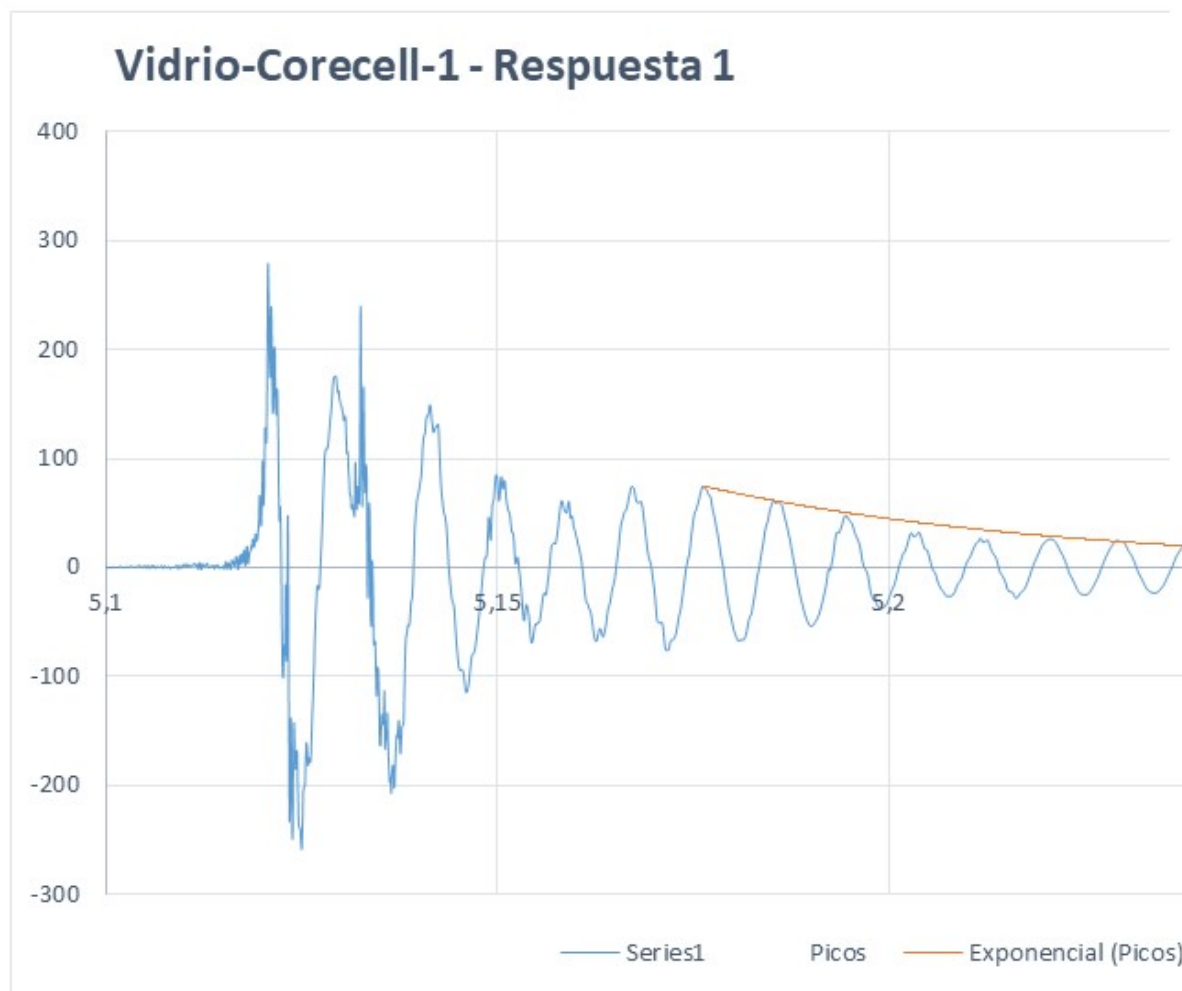
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	21,71416	36,463726
A10	21,85791	3,878944
δ	0,2240755	
ξ	0,03564007	
B1	21,699805	54,873159
B11	21,85791	3,878944
δ	0,24086012	
ξ	0,03830594	



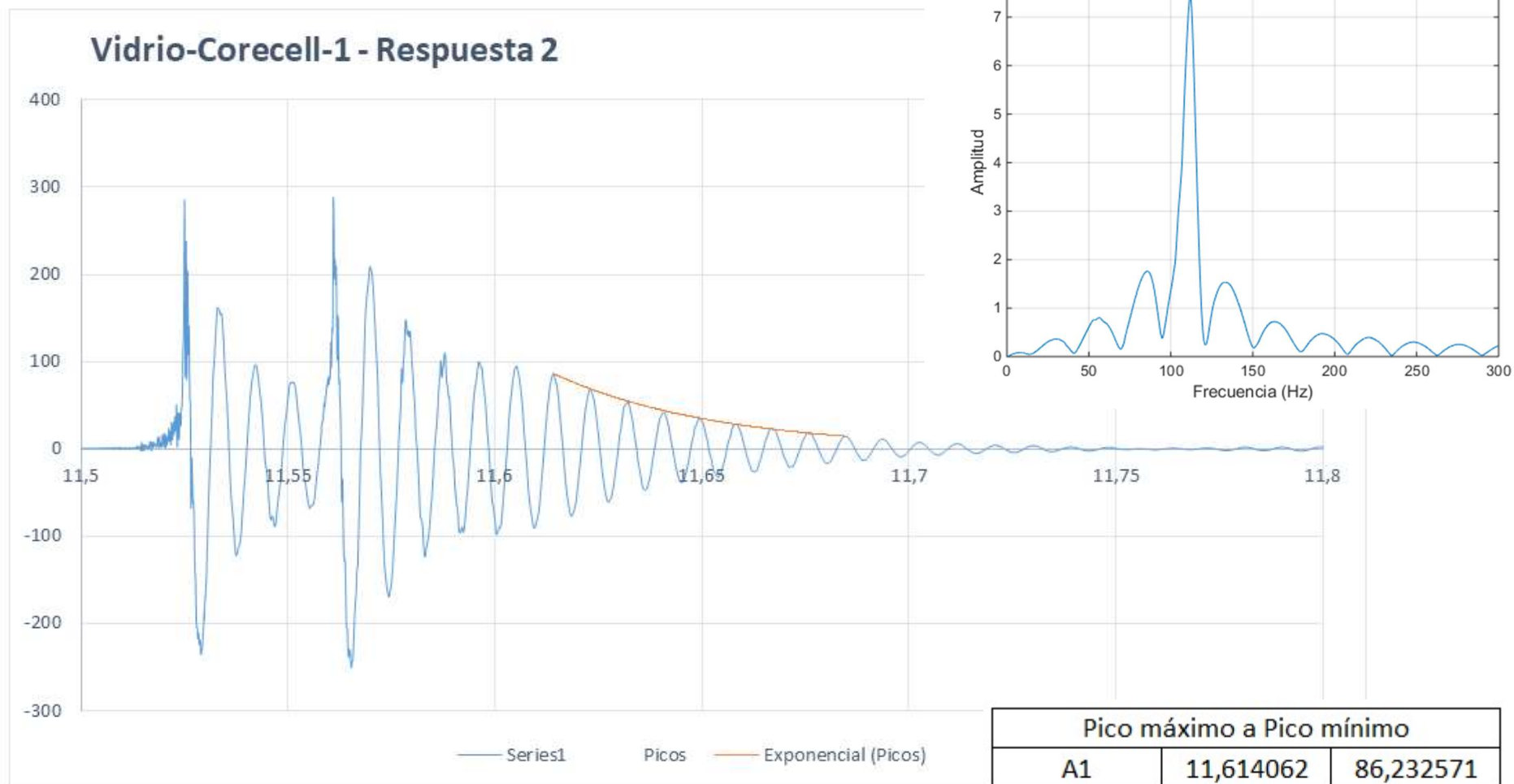
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	26,037695	39,115019
A9	26,167676	3,457705
δ	0,2695446	
ξ	0,04285994	
B1	26,023828	68,432806
B10	26,167676	3,457705
δ	0,29852473	
ξ	0,04745815	

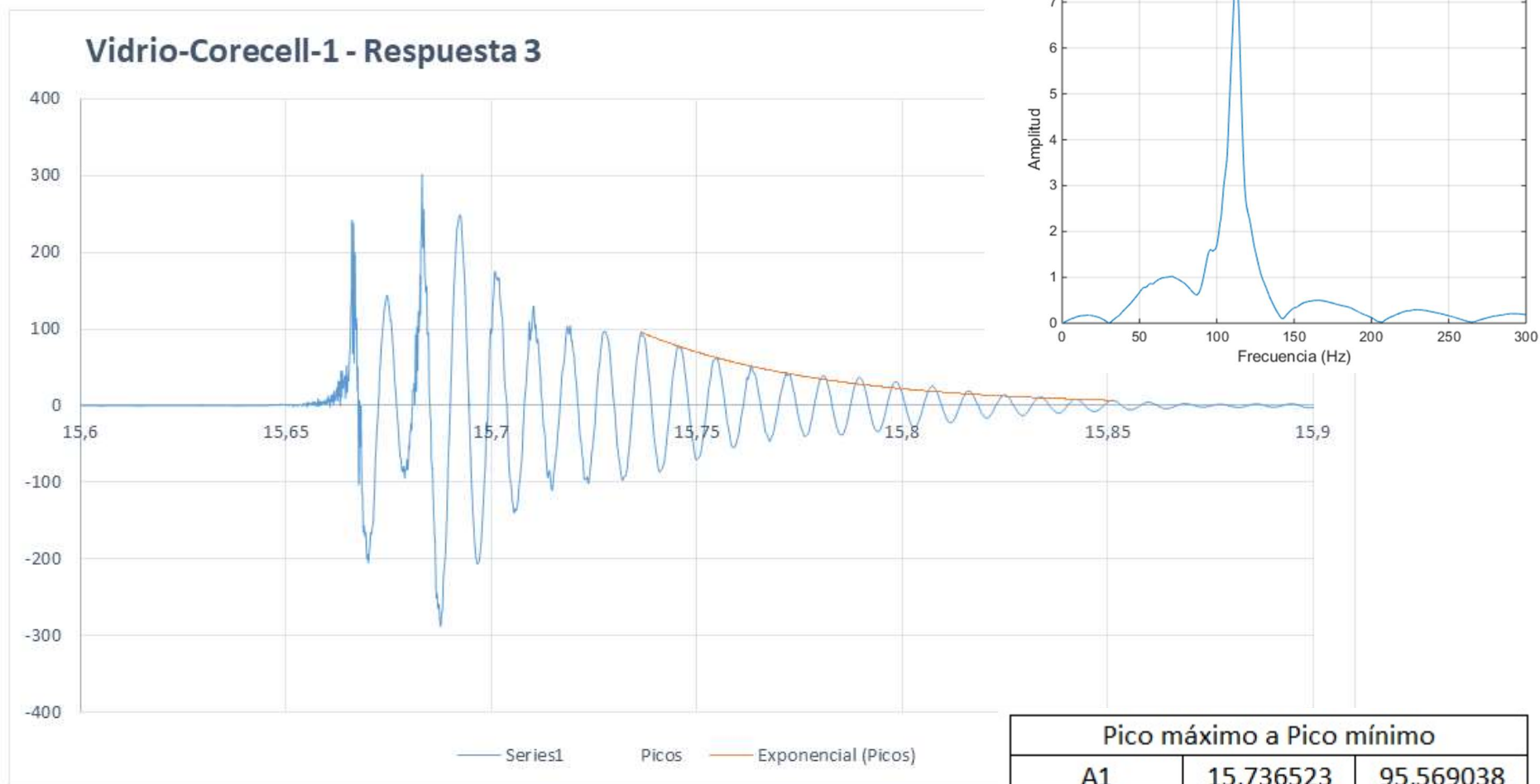


Channels	1
Samples	332800
Date	26/03/2018
Time	19:27:24
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	19:15,1
Delta_X	9,77E-05

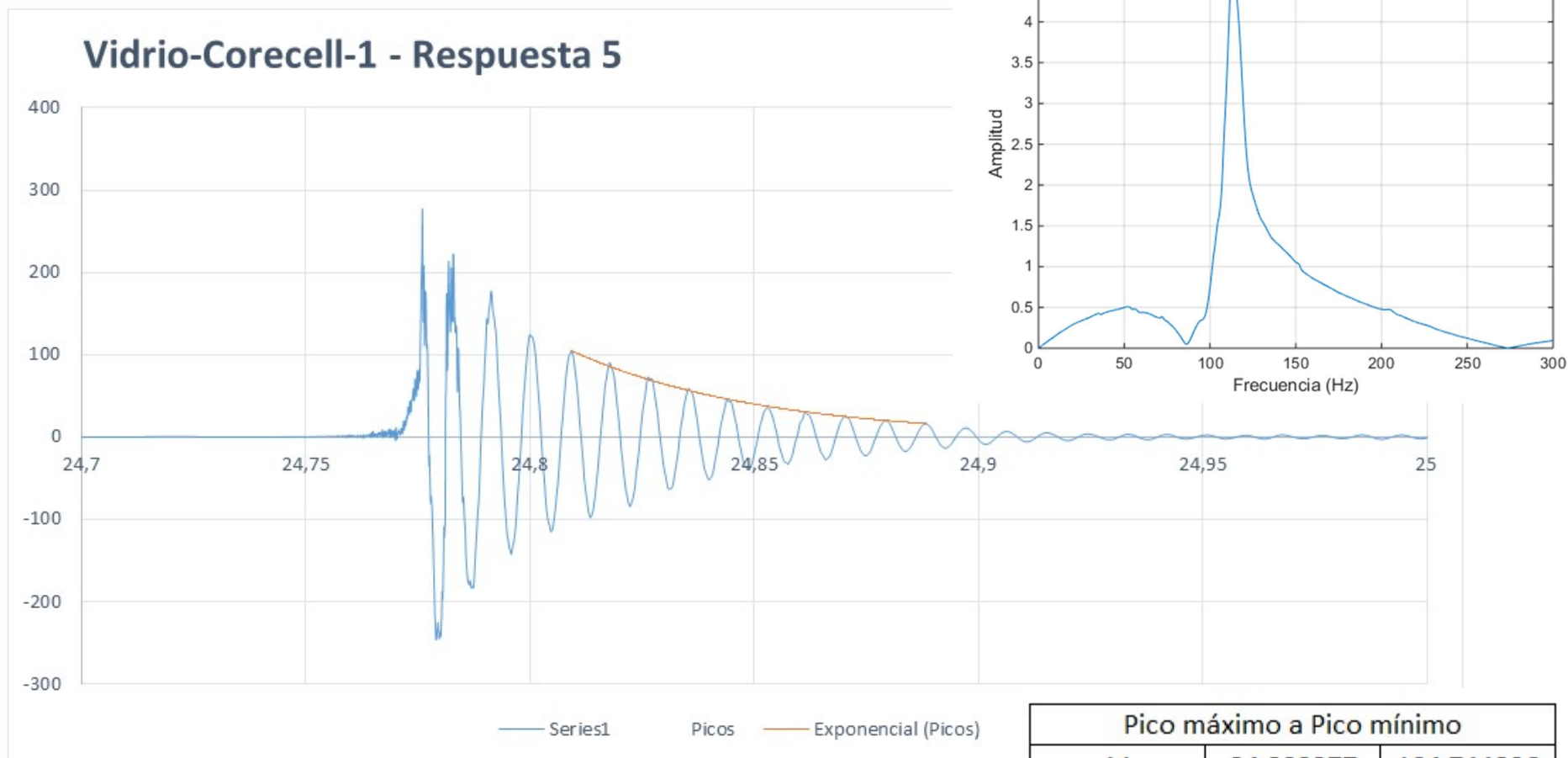


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	5,176172	74,61262
A10	5,264941	10,922296
δ	0,19215035	
ξ	0,03056739	

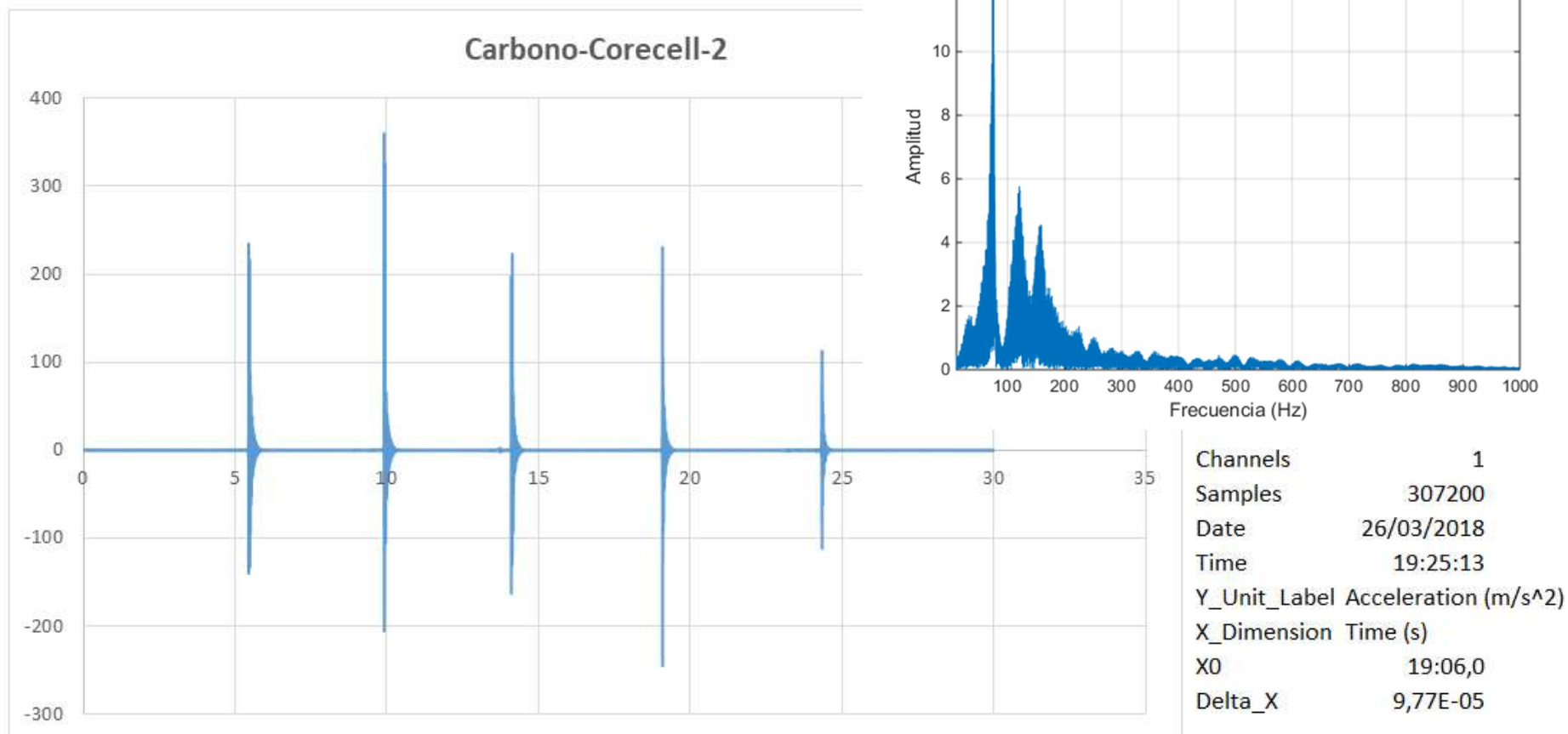


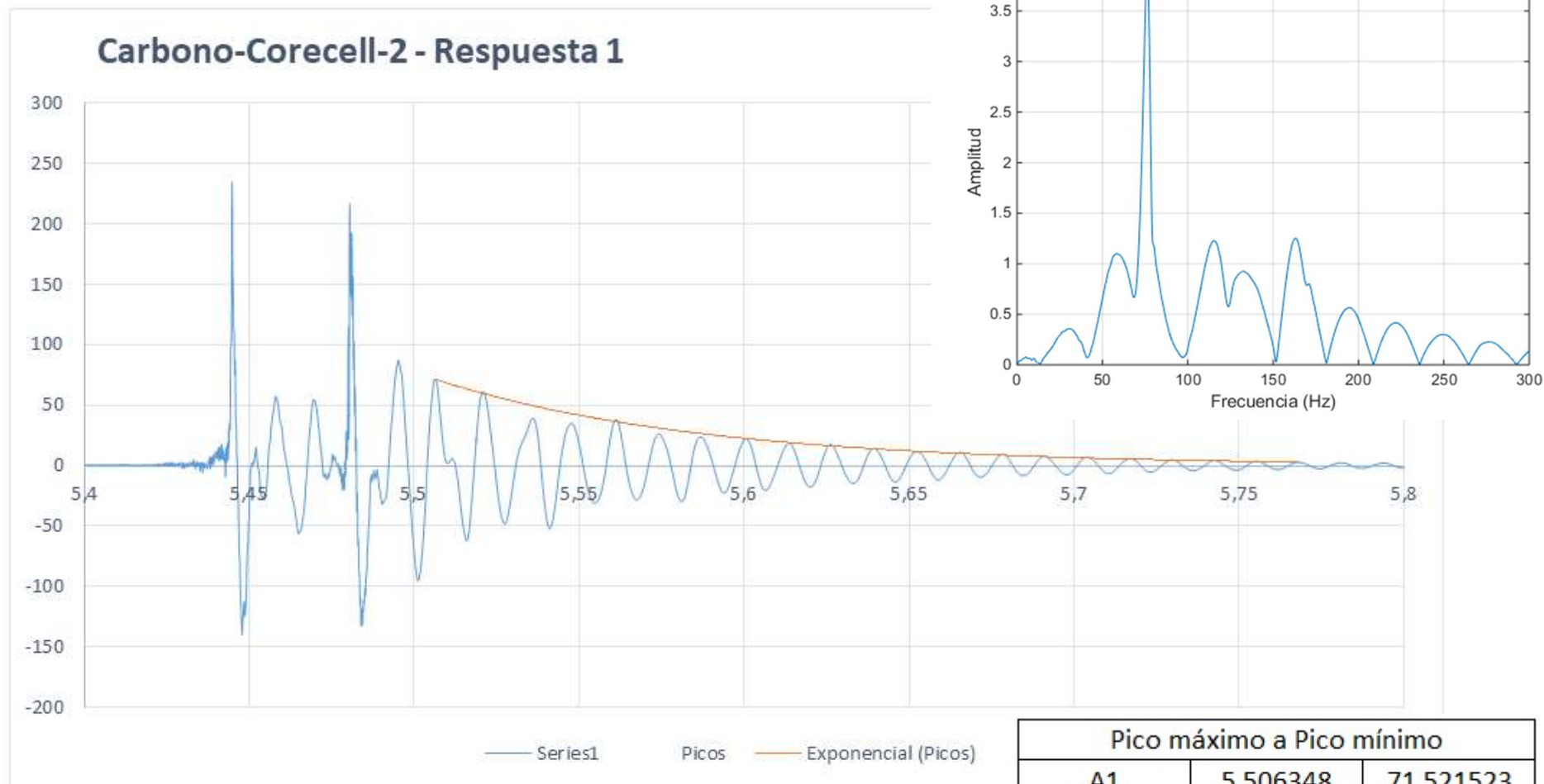


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	15,736523	95,569038
A13	15,851367	6,660015
δ	0,20490209	
ξ	0,03259385	

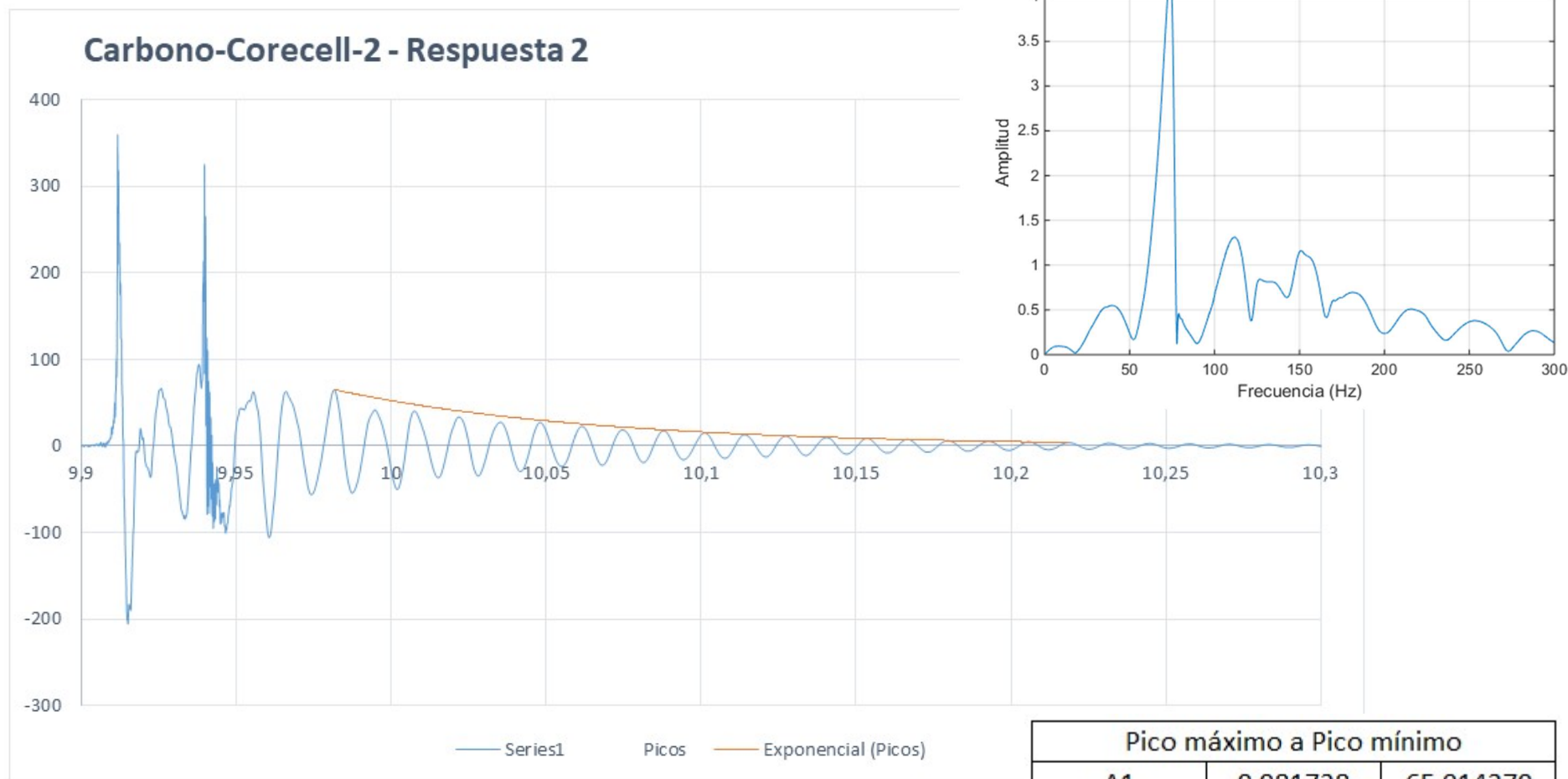


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	24,809277	104,744806
A9	24,888379	16,079615
δ	0,20821941	
ξ	0,03312097	

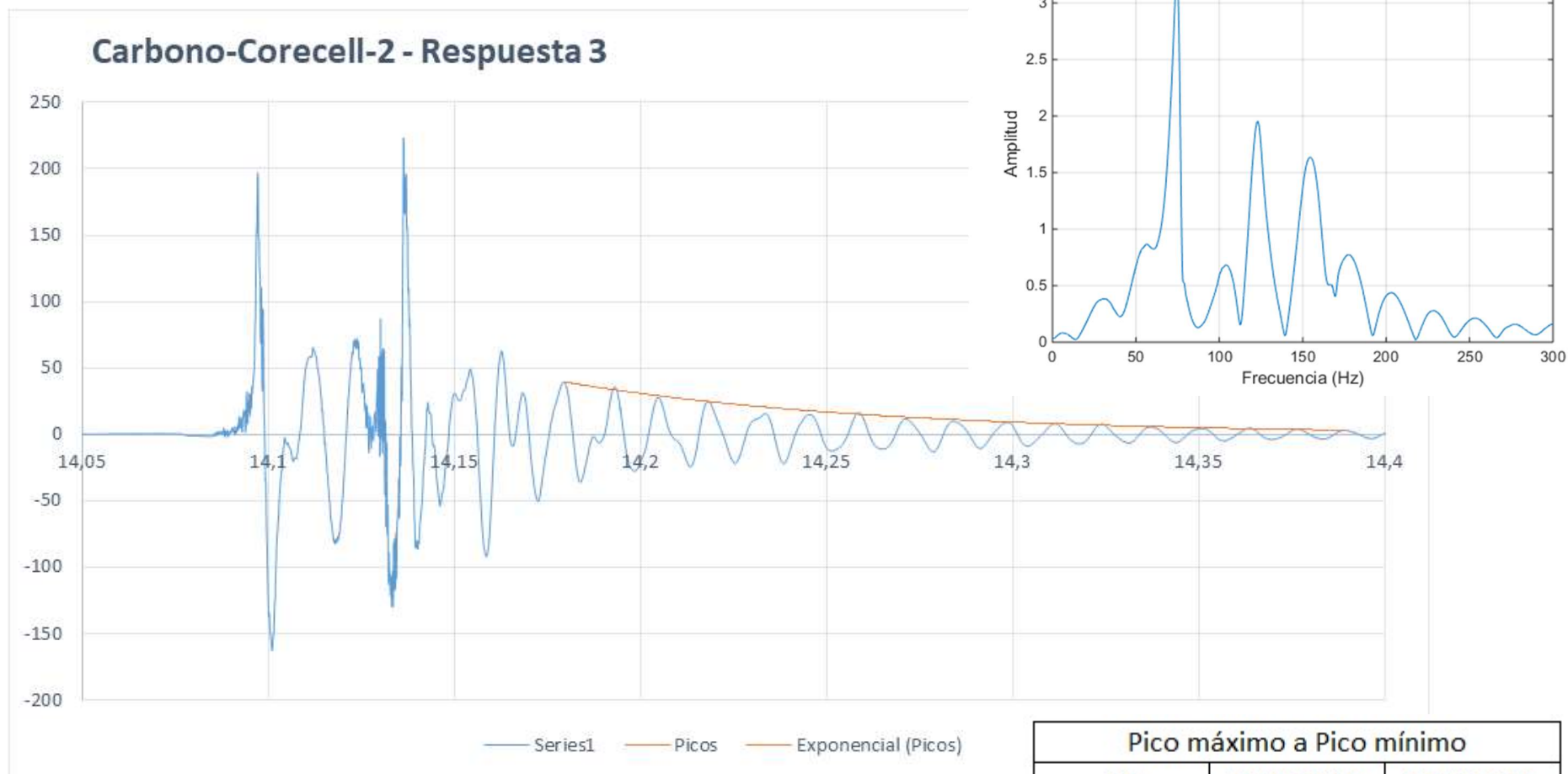




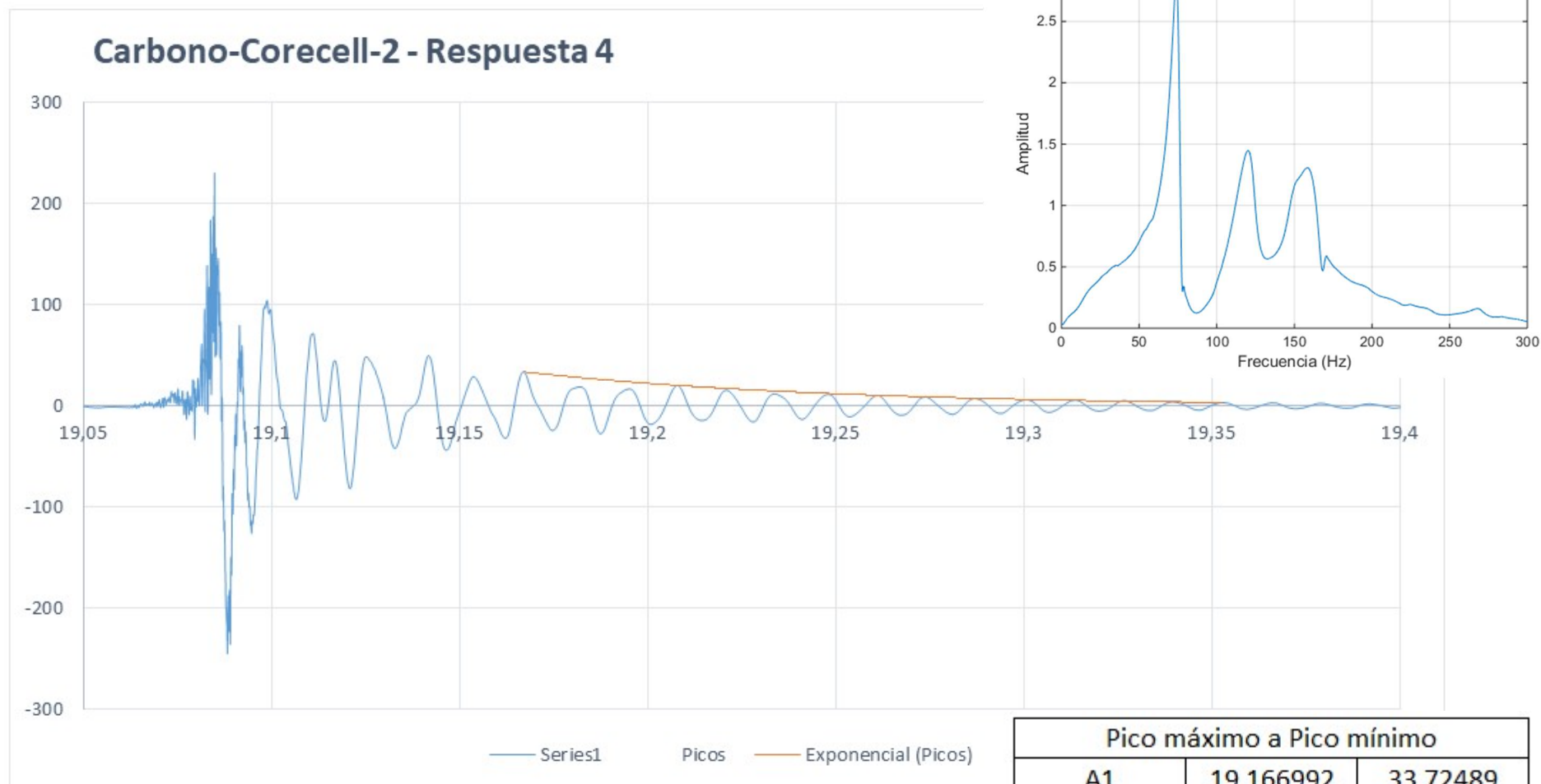
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	5,506348	71,521523
A20	5,768164	2,836609
δ	0,16136946	
ξ	0,02567428	



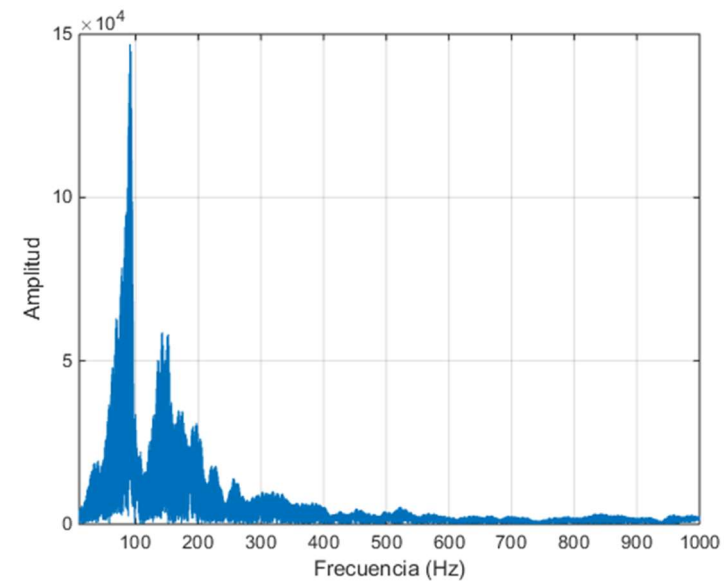
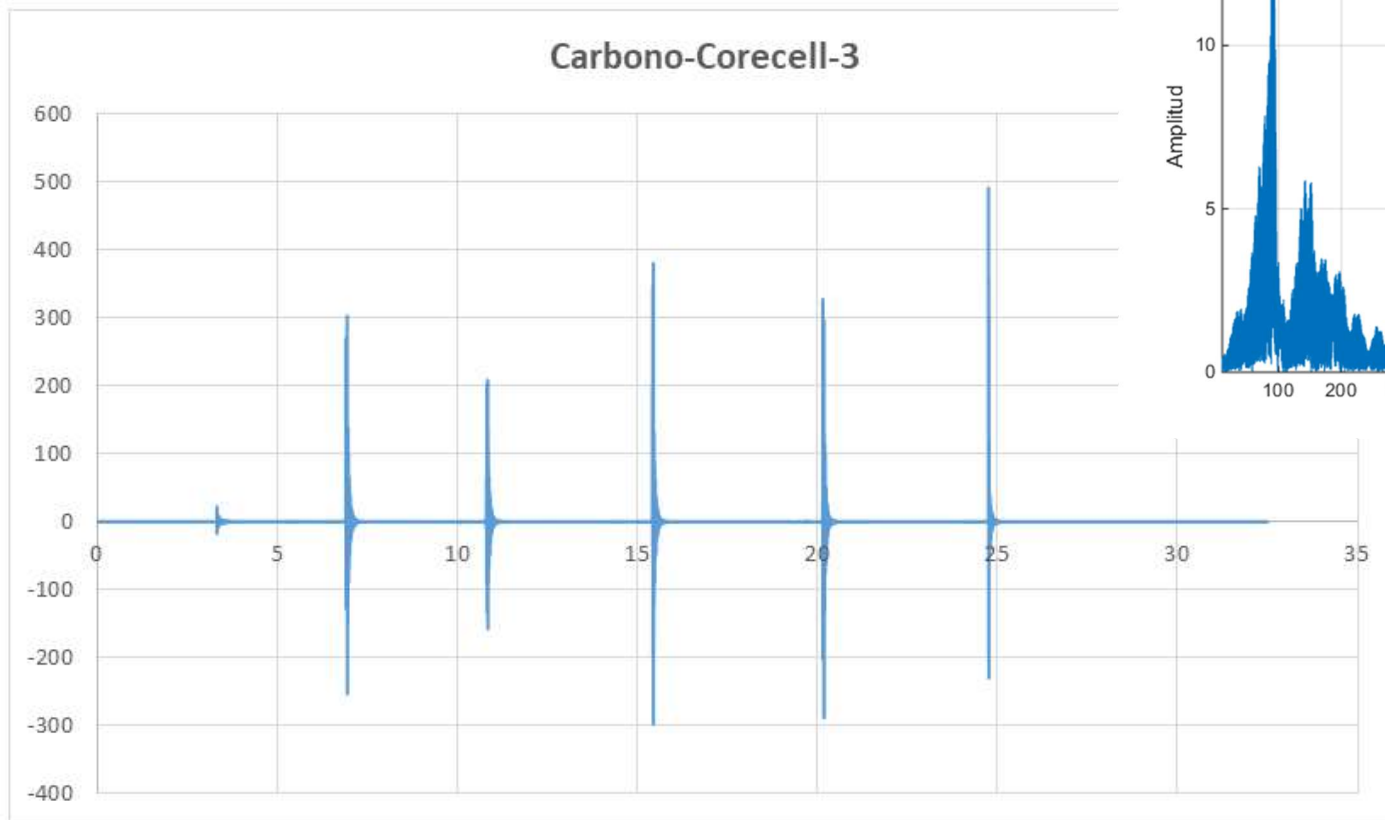
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	9,981738	65,014279
A16	10,218262	3,977742
δ	0,17461829	
ξ	0,02778064	



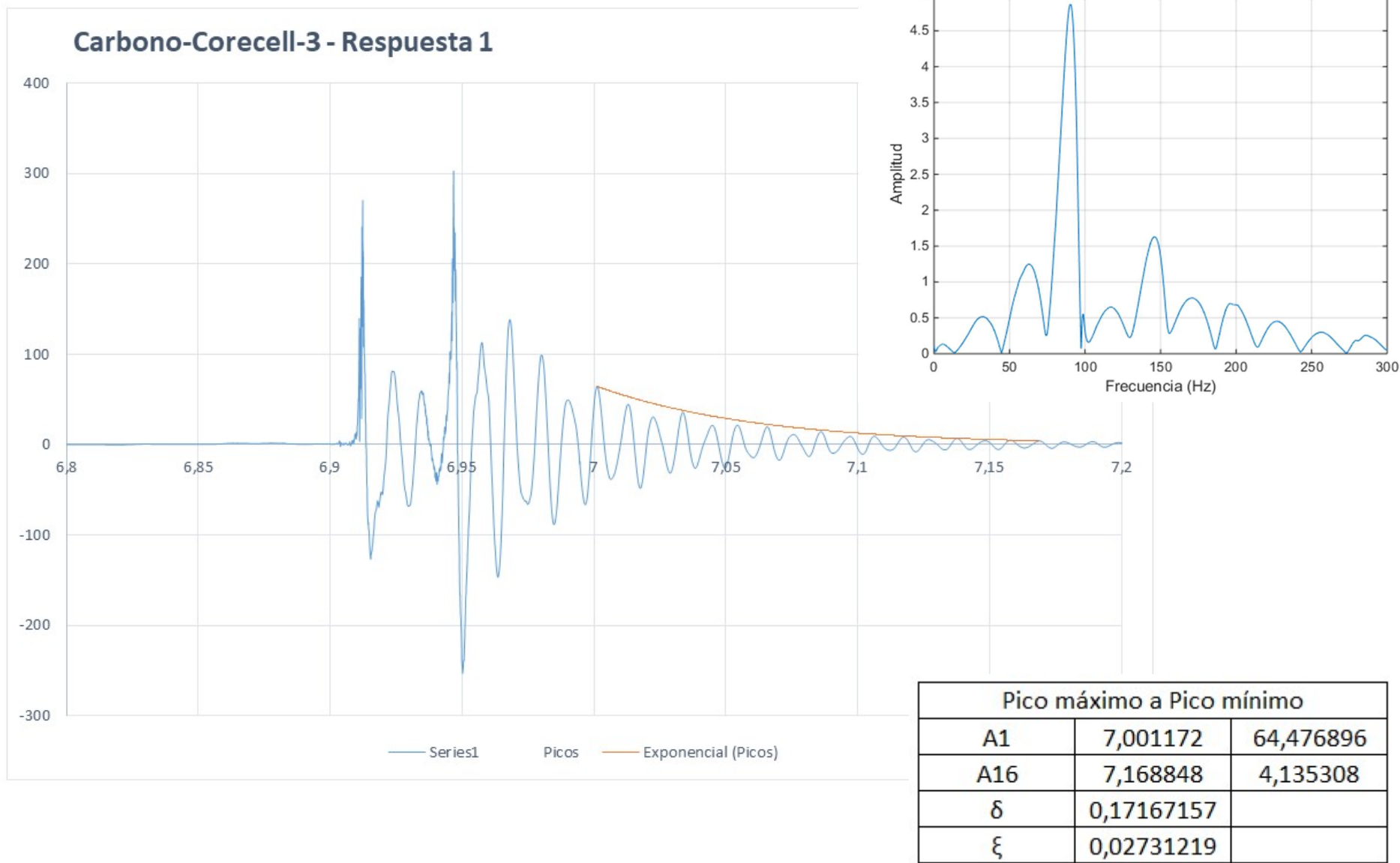
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	14,179395	39,557085
A16	14,389355	3,09419
δ	0,15926367	
ξ	0,02533946	

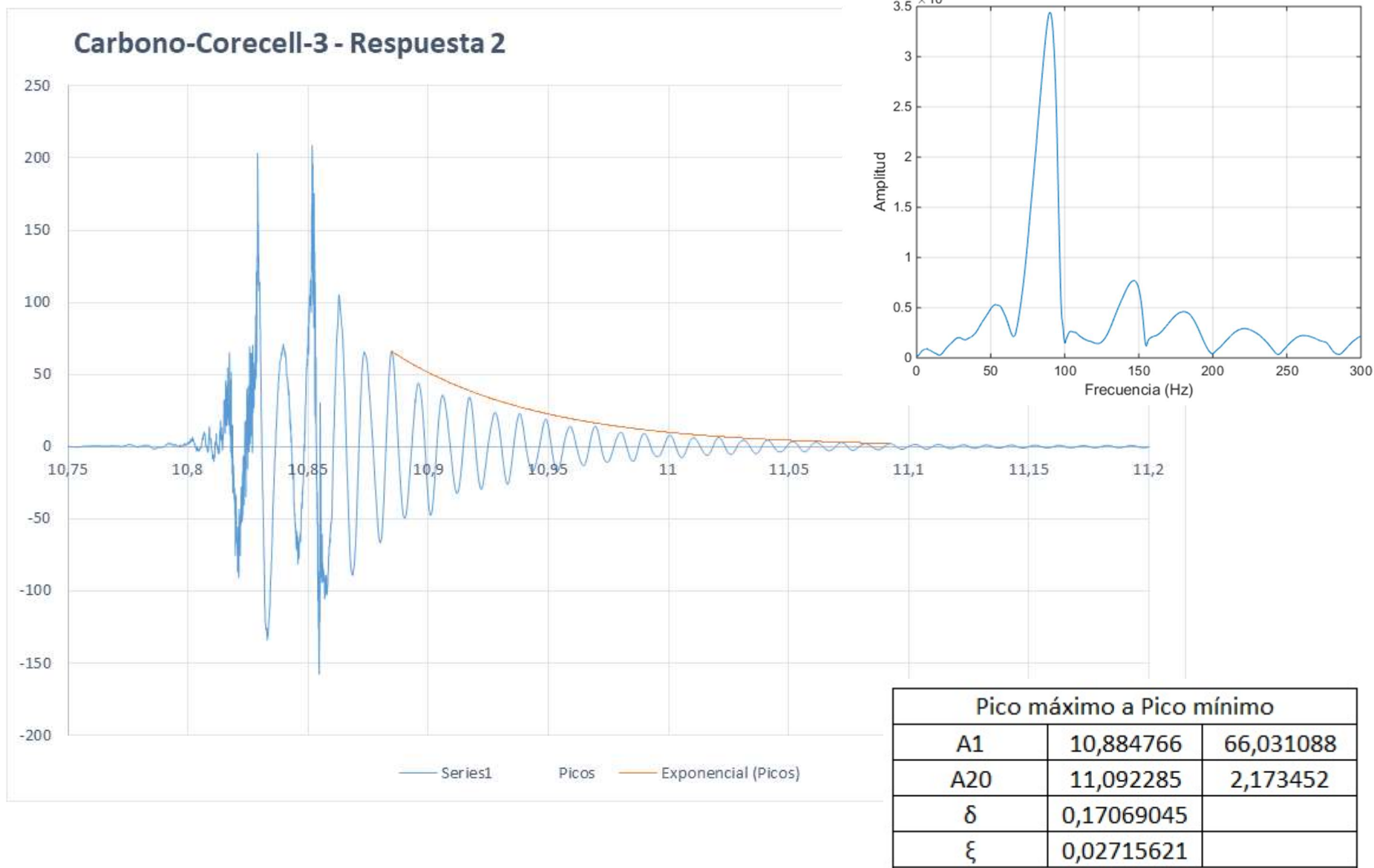


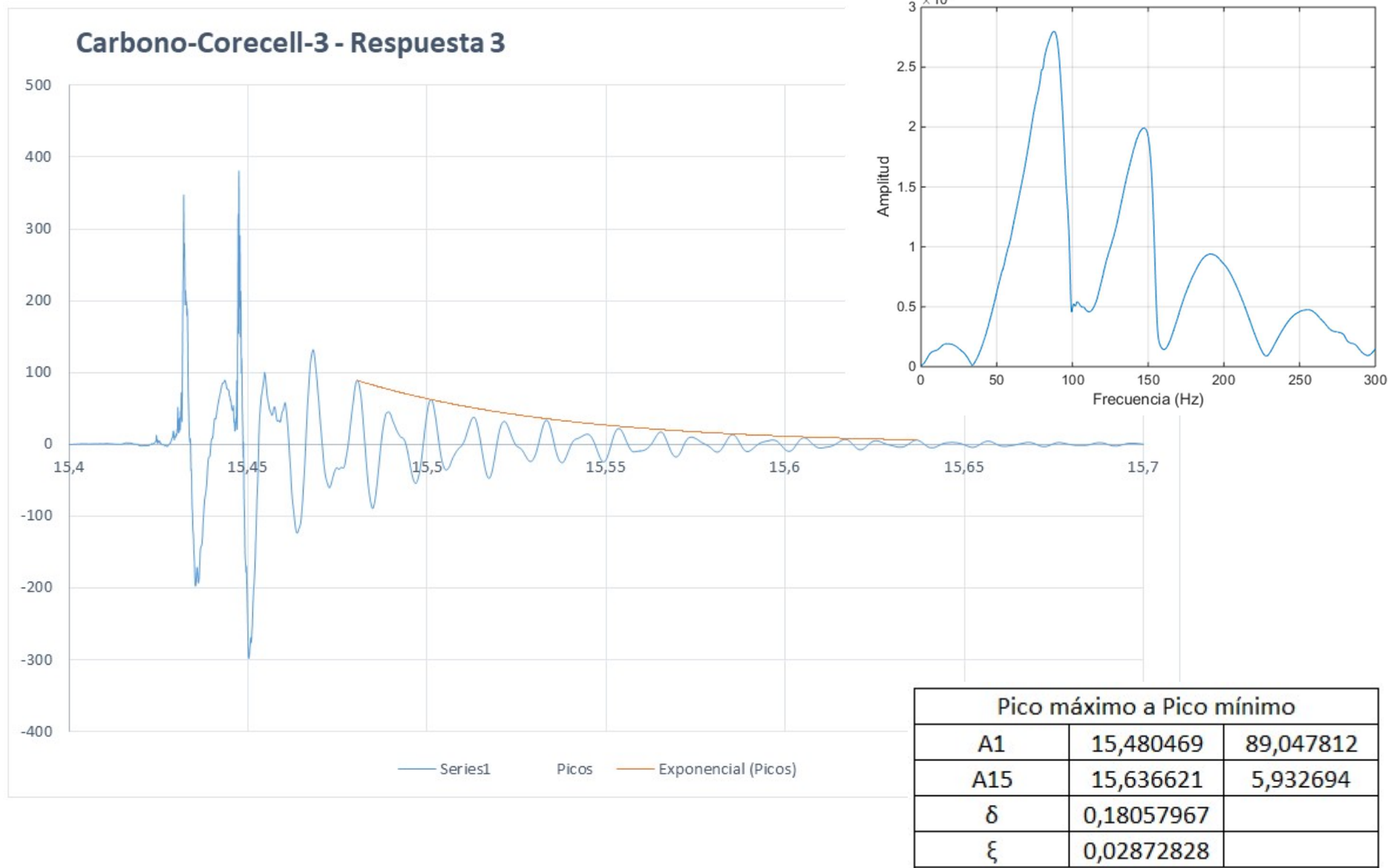
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	19,166992	33,72489
A14	19,352637	3,346087
δ	0,16503175	
ξ	0,02625656	

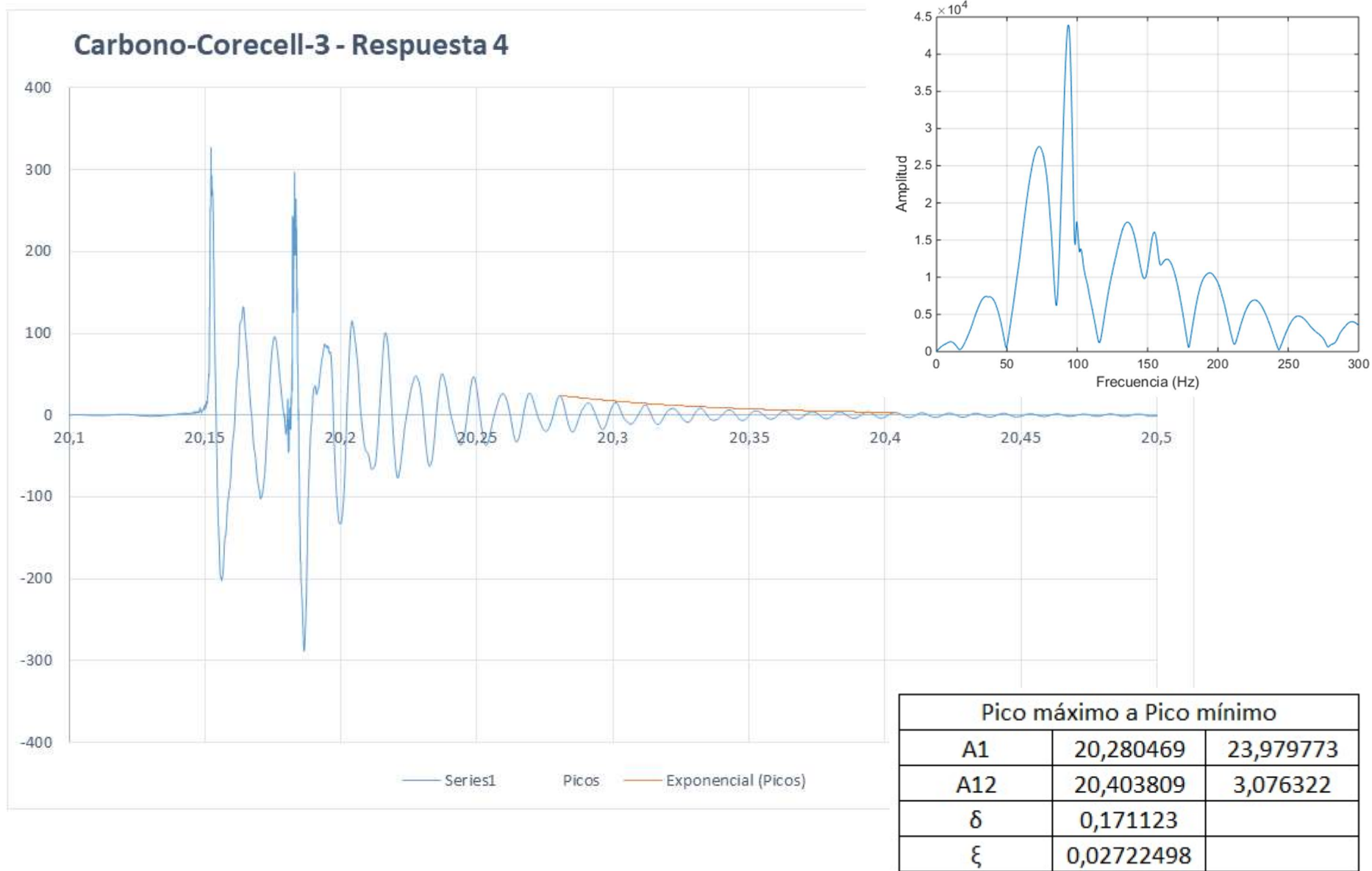


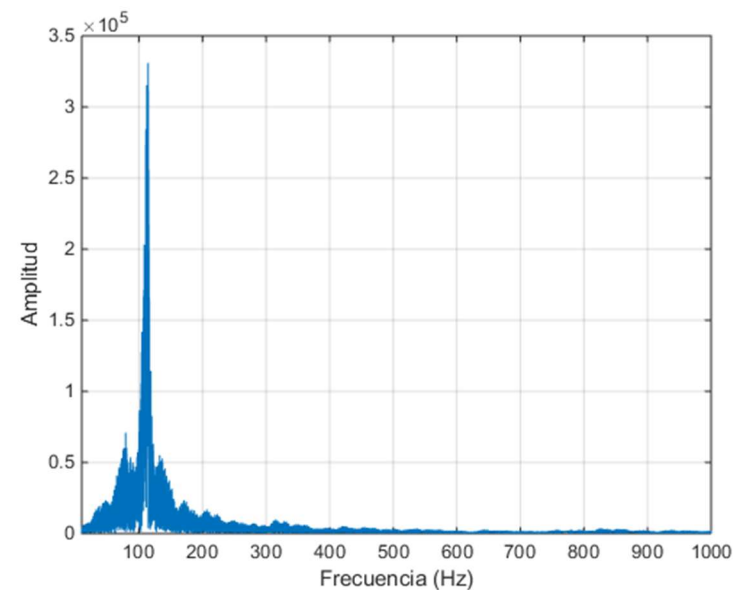
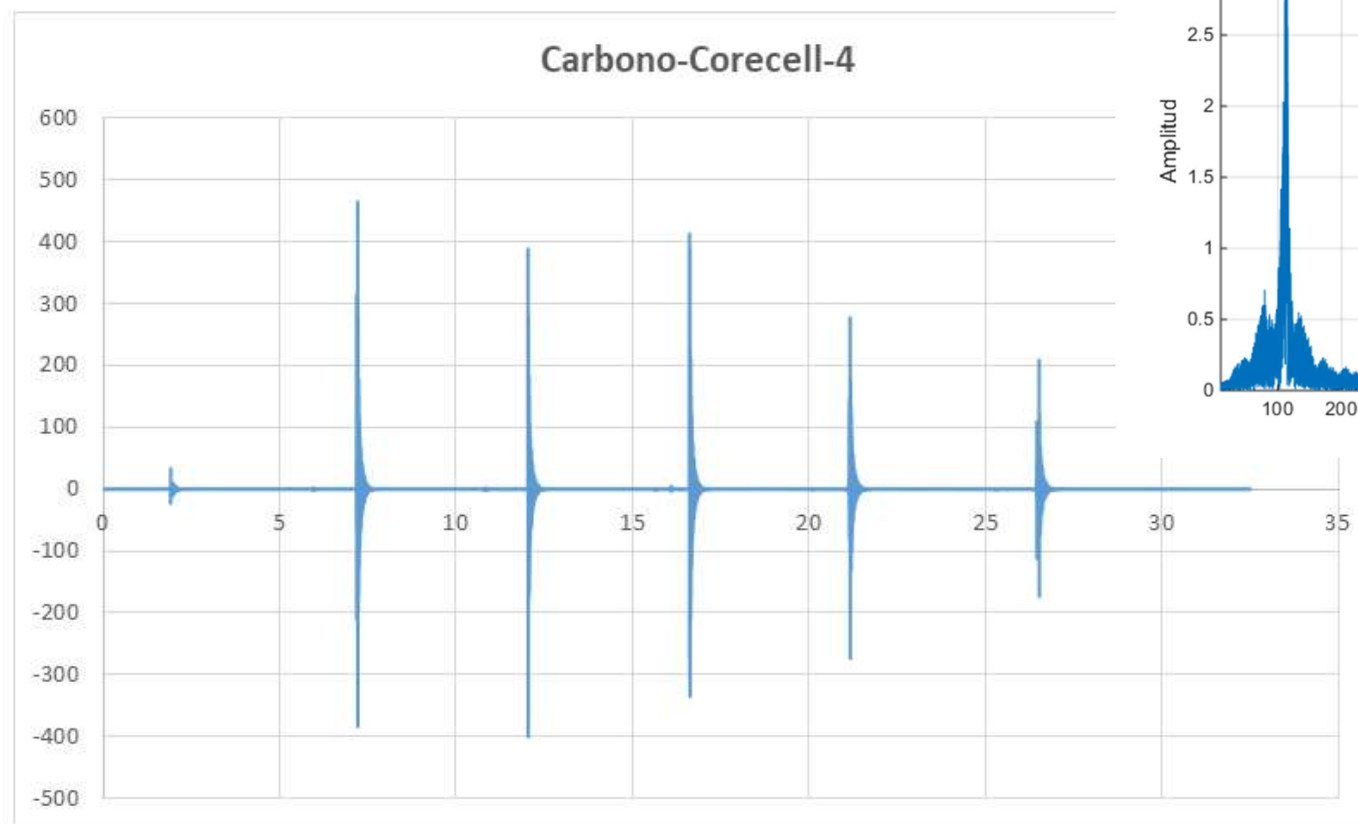
Channels	1
Samples	332800
Date	26/03/2018
Time	19:25:57
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	19:09,9
Delta_X	9,77E-05



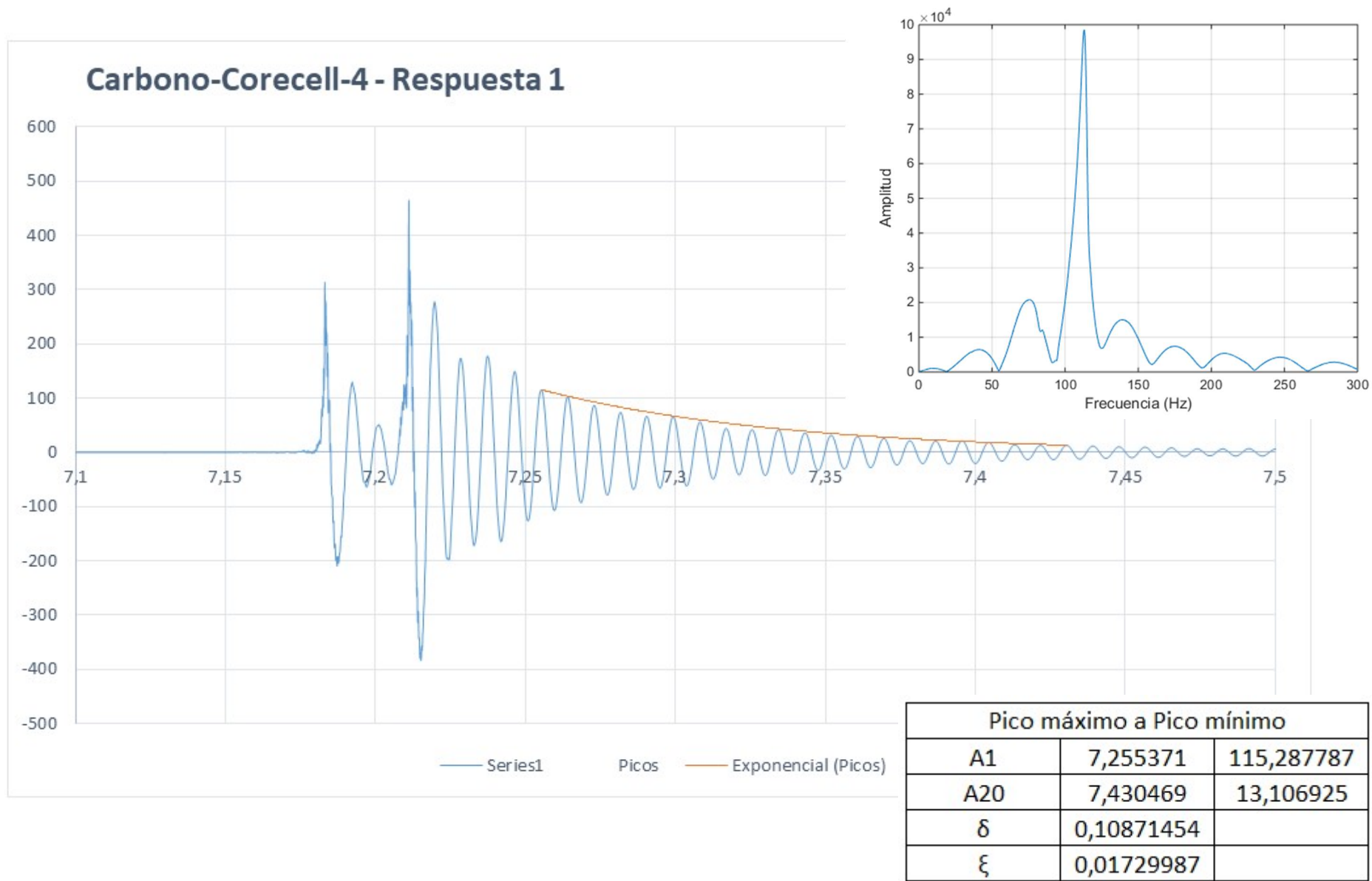


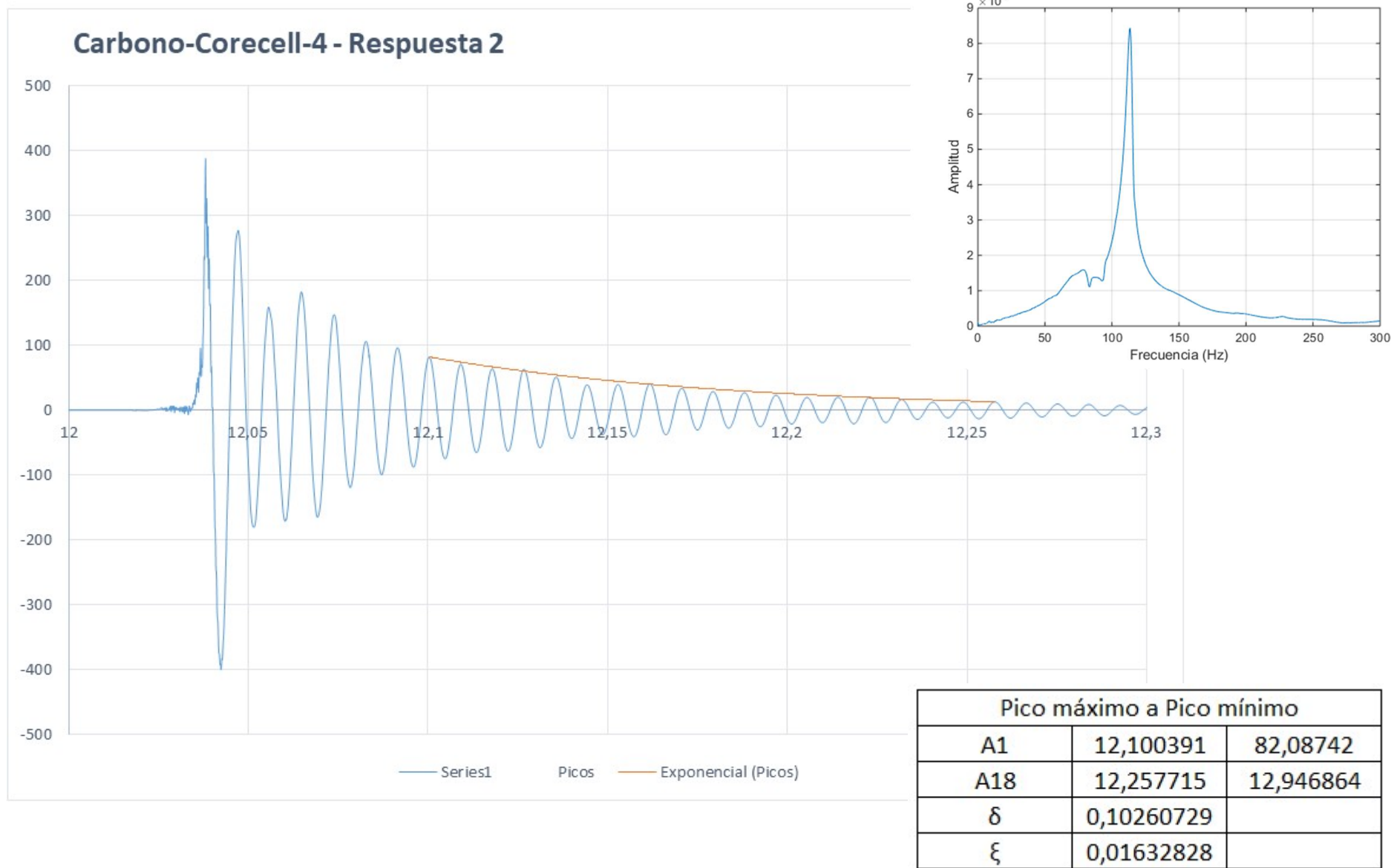


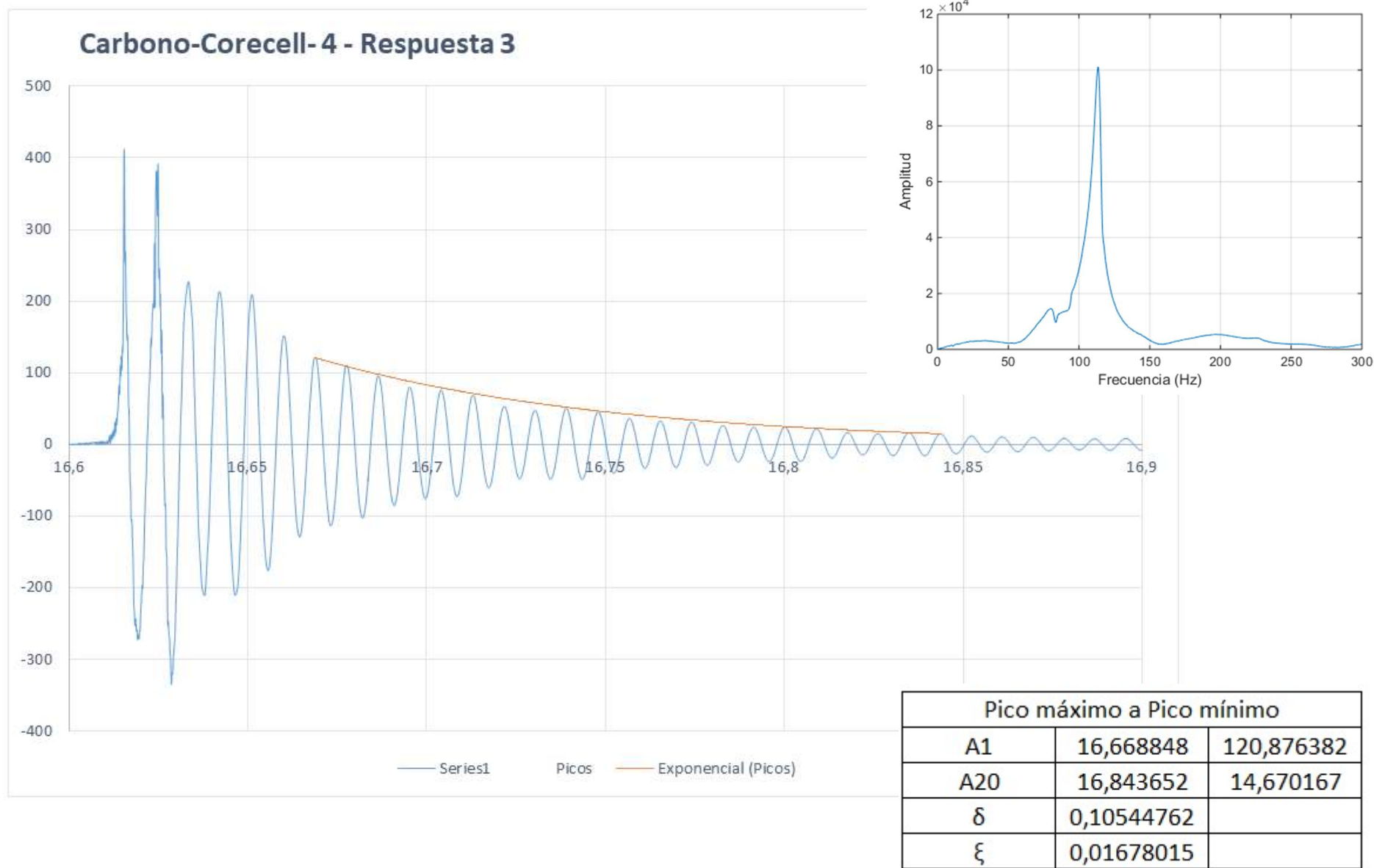


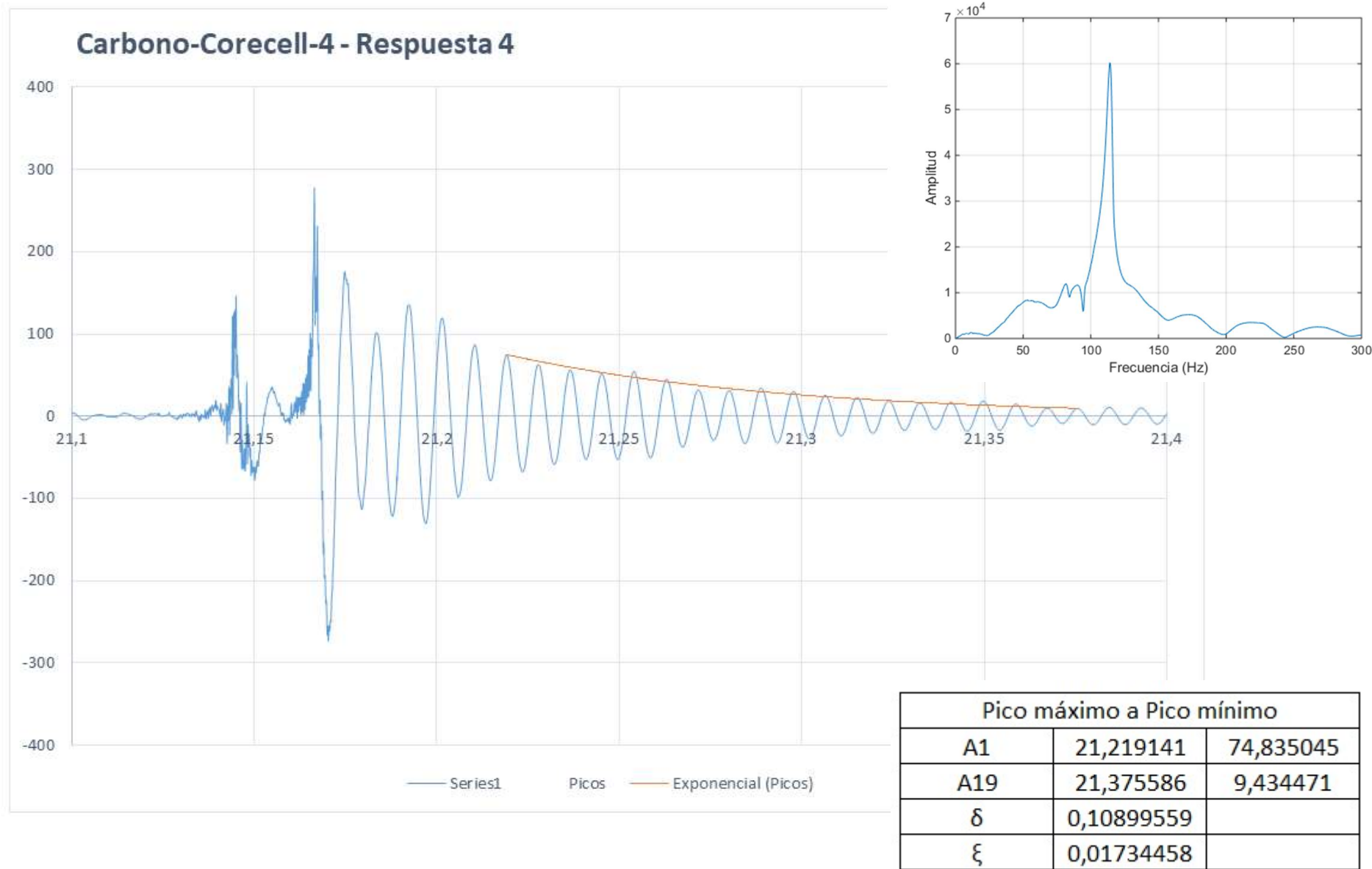


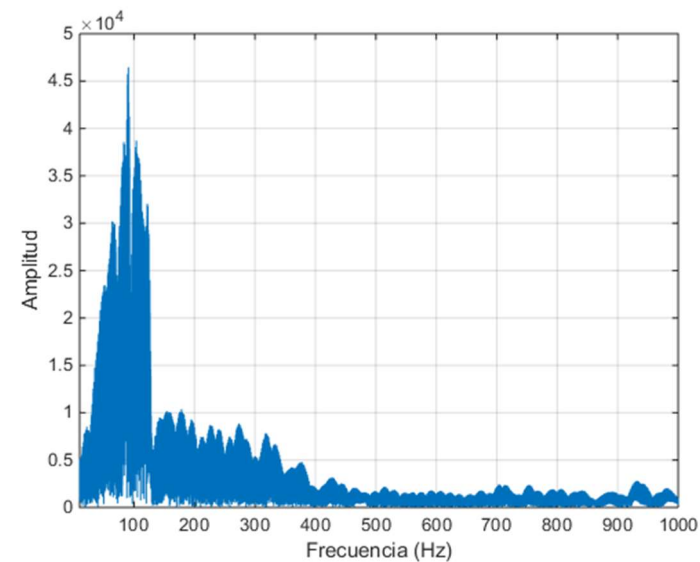
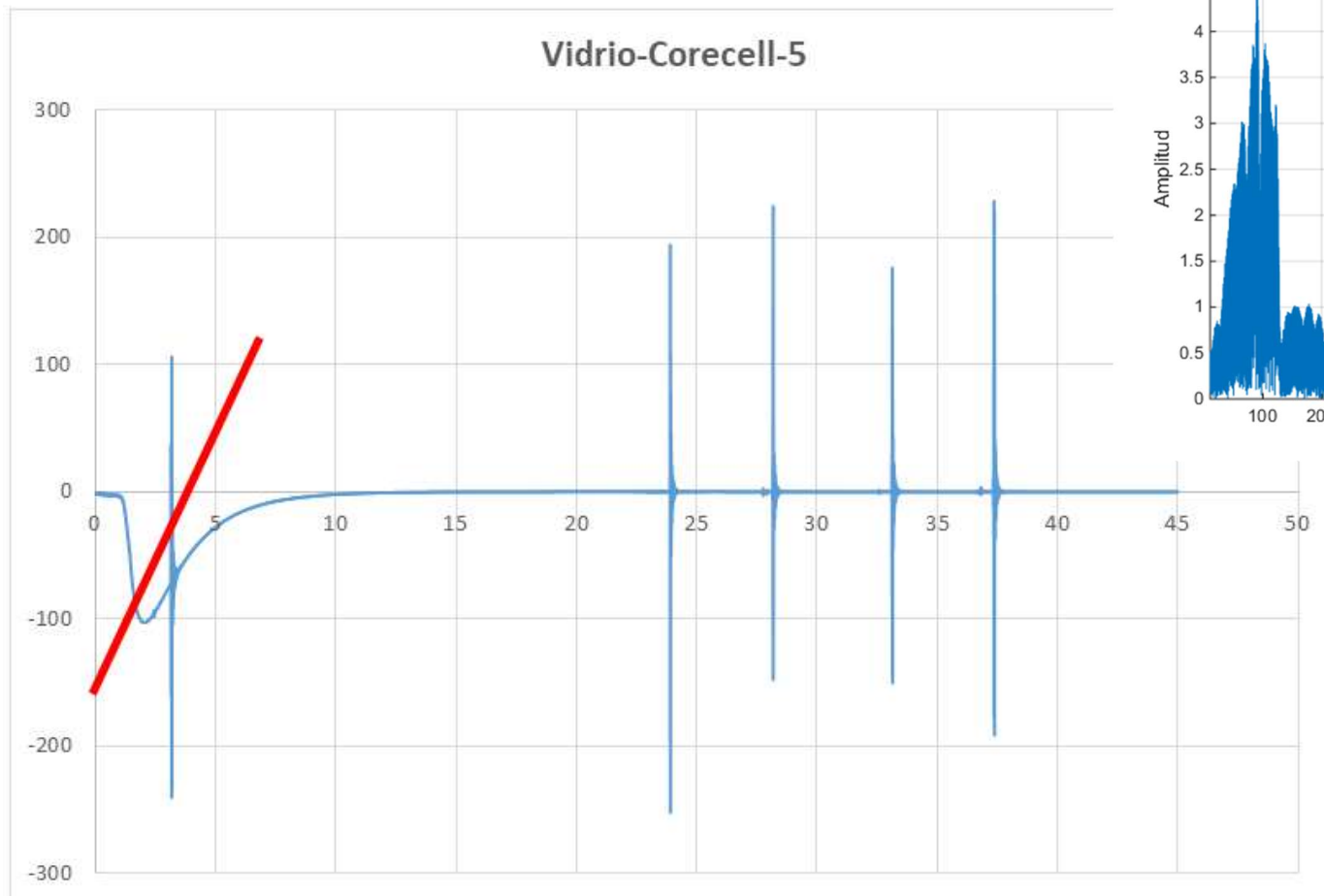
Channels	1
Samples	332800
Date	26/03/2018
Time	19:26:37
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	19:11,7
Delta_X	9,77E-05



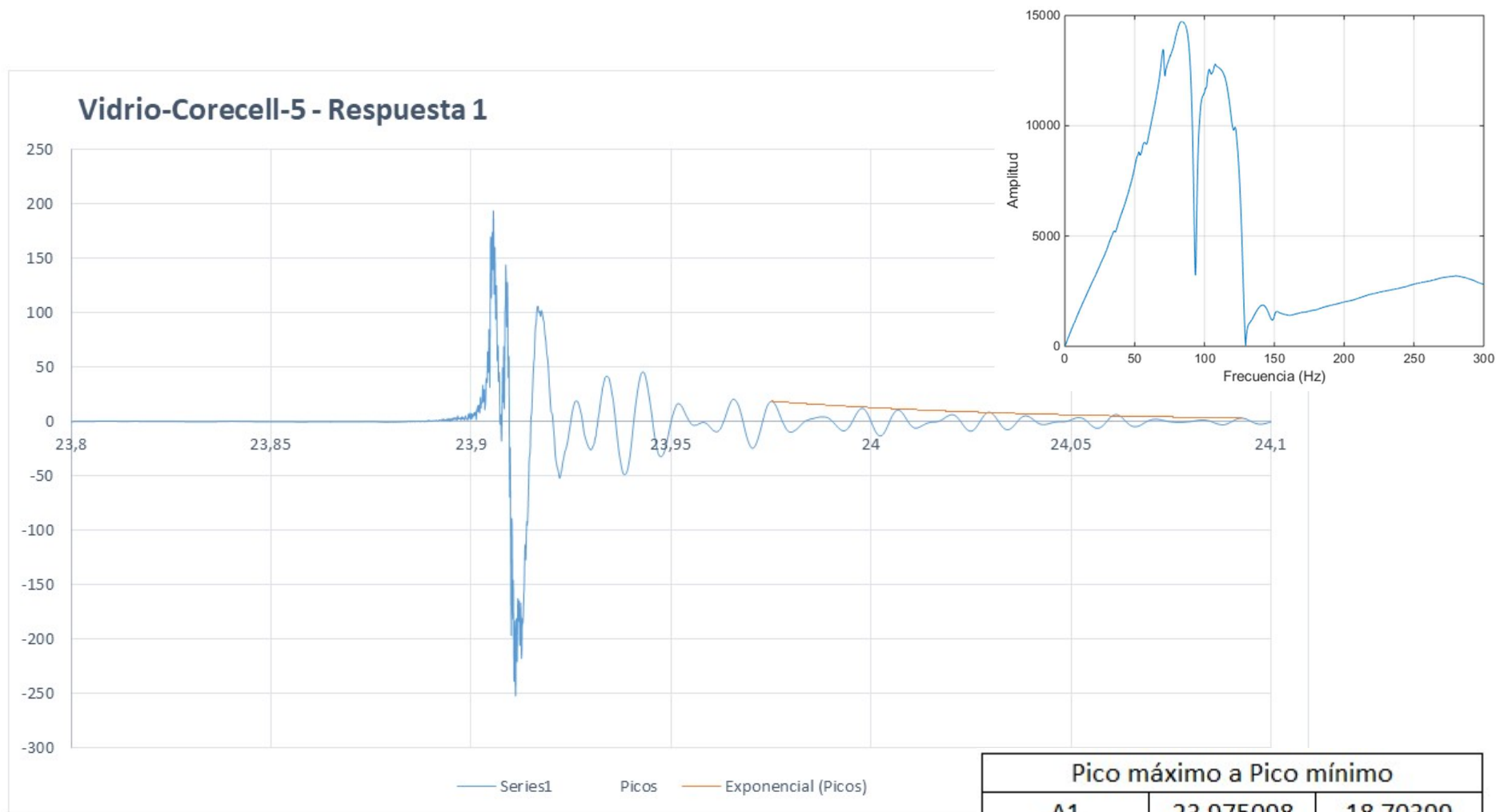




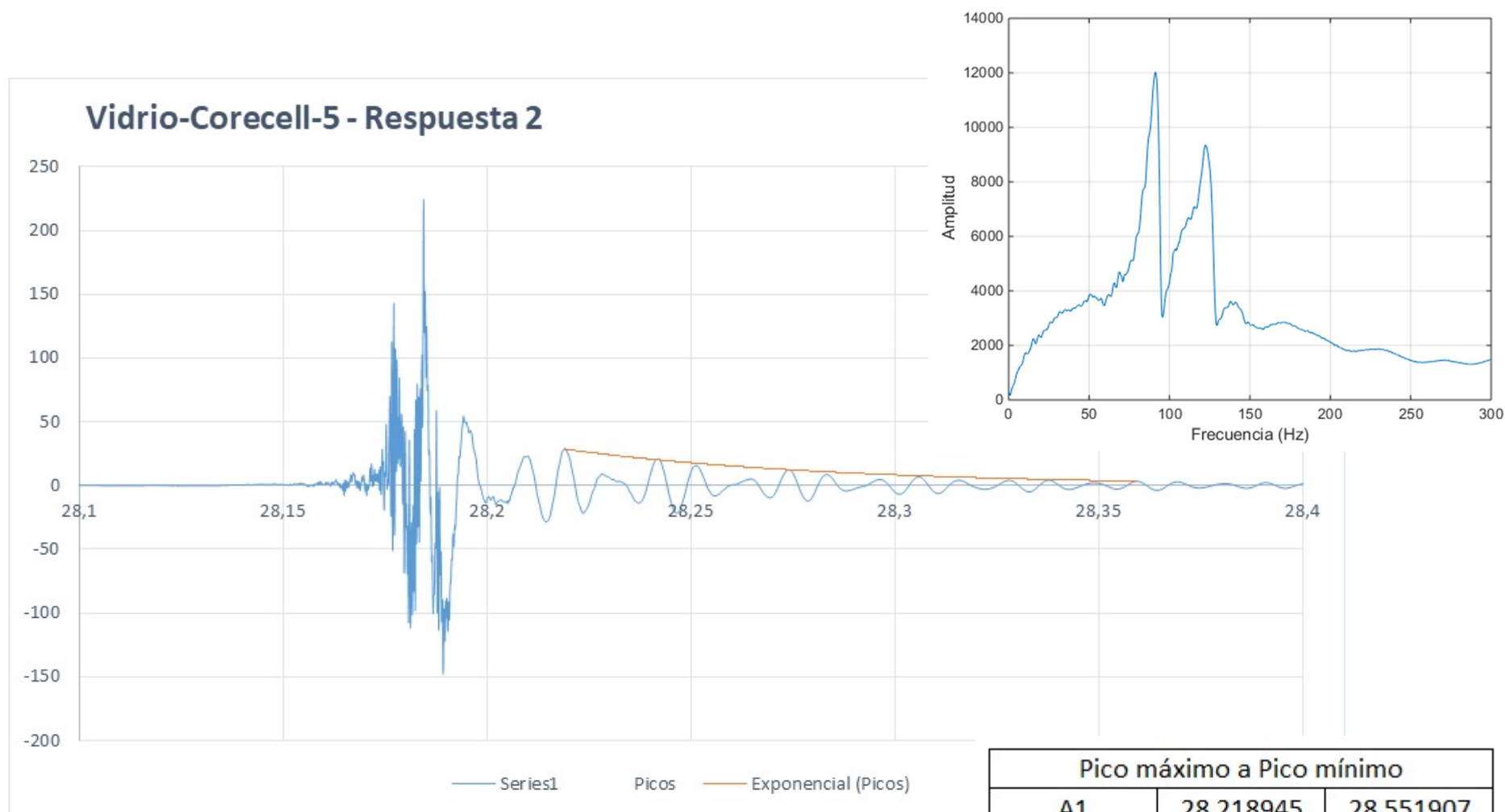




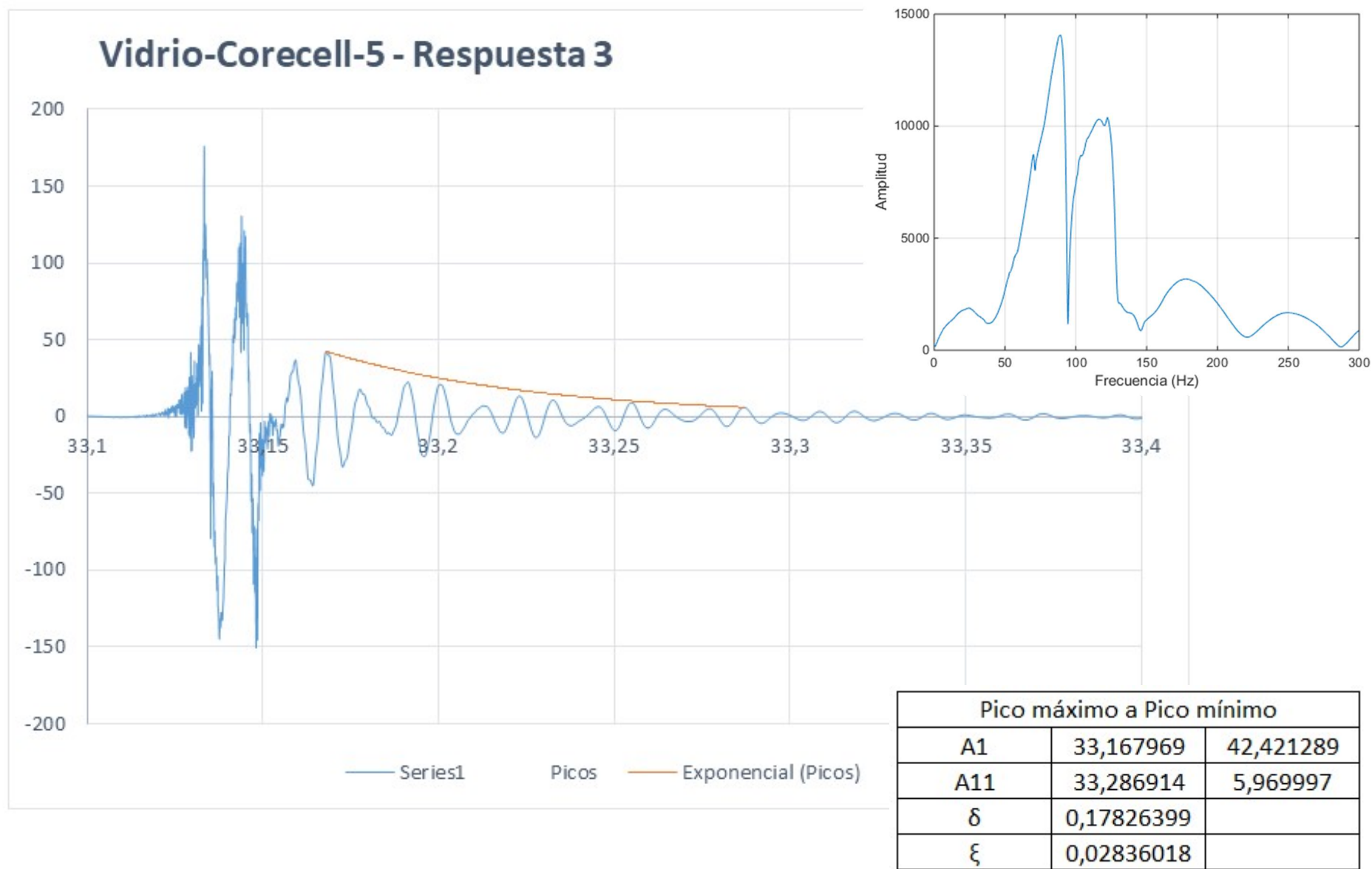
Channels	1
Samples	460800
Date	26/03/2018
Time	19:28:05
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	19:18,8
Delta_X	9,77E-05

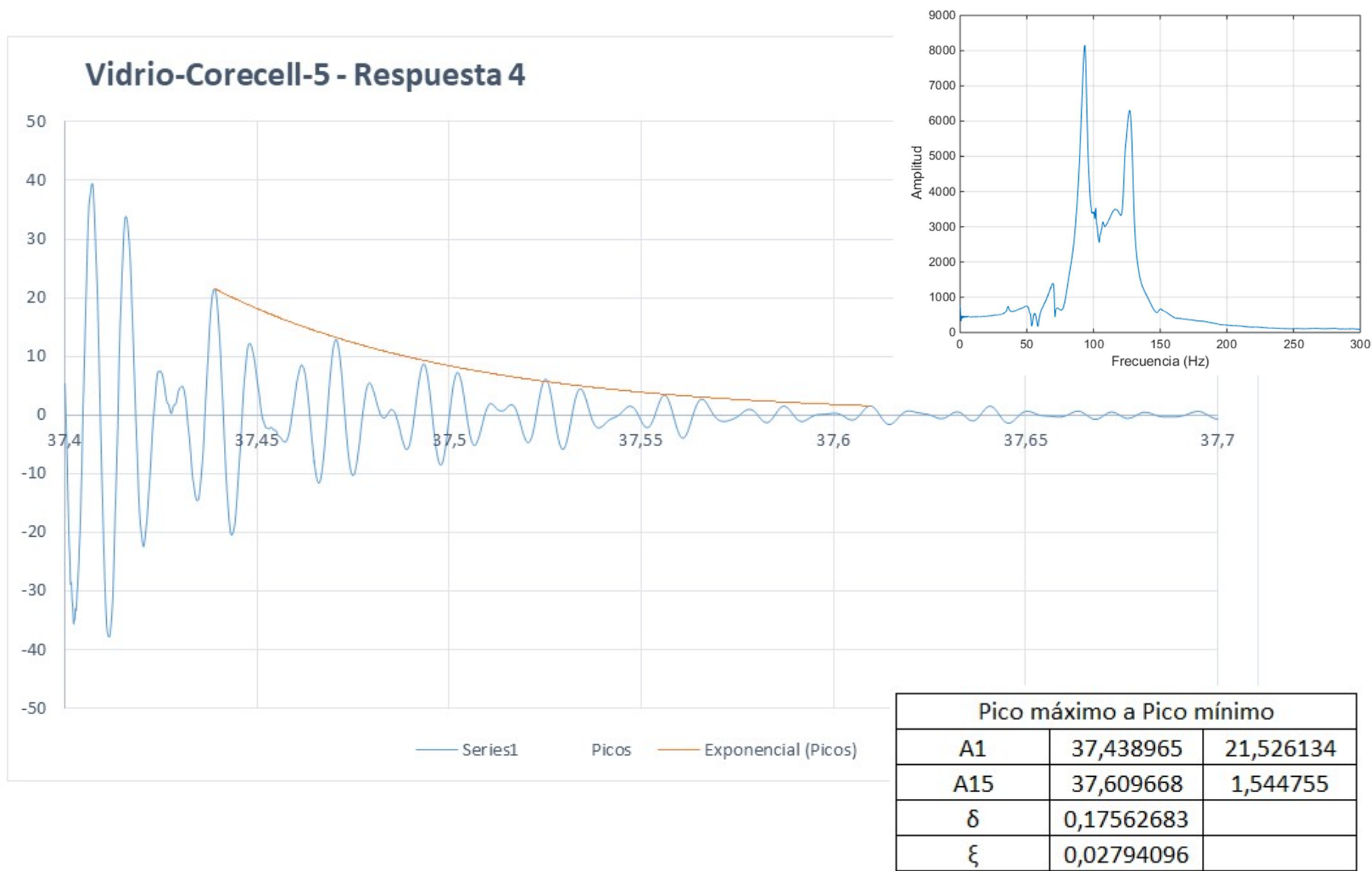


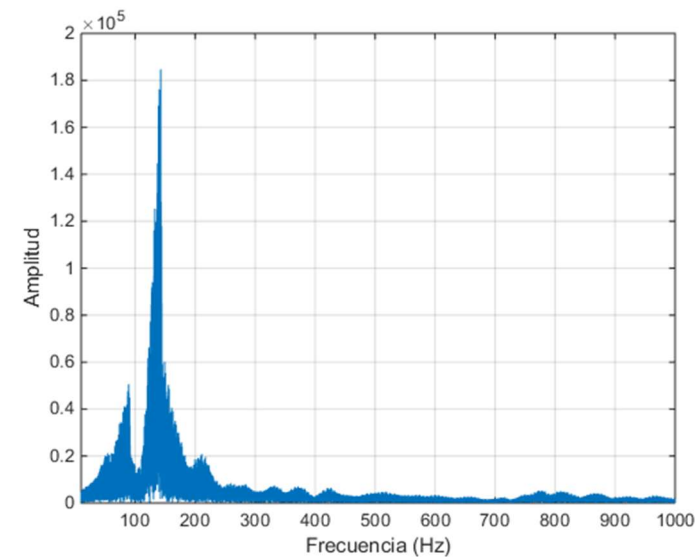
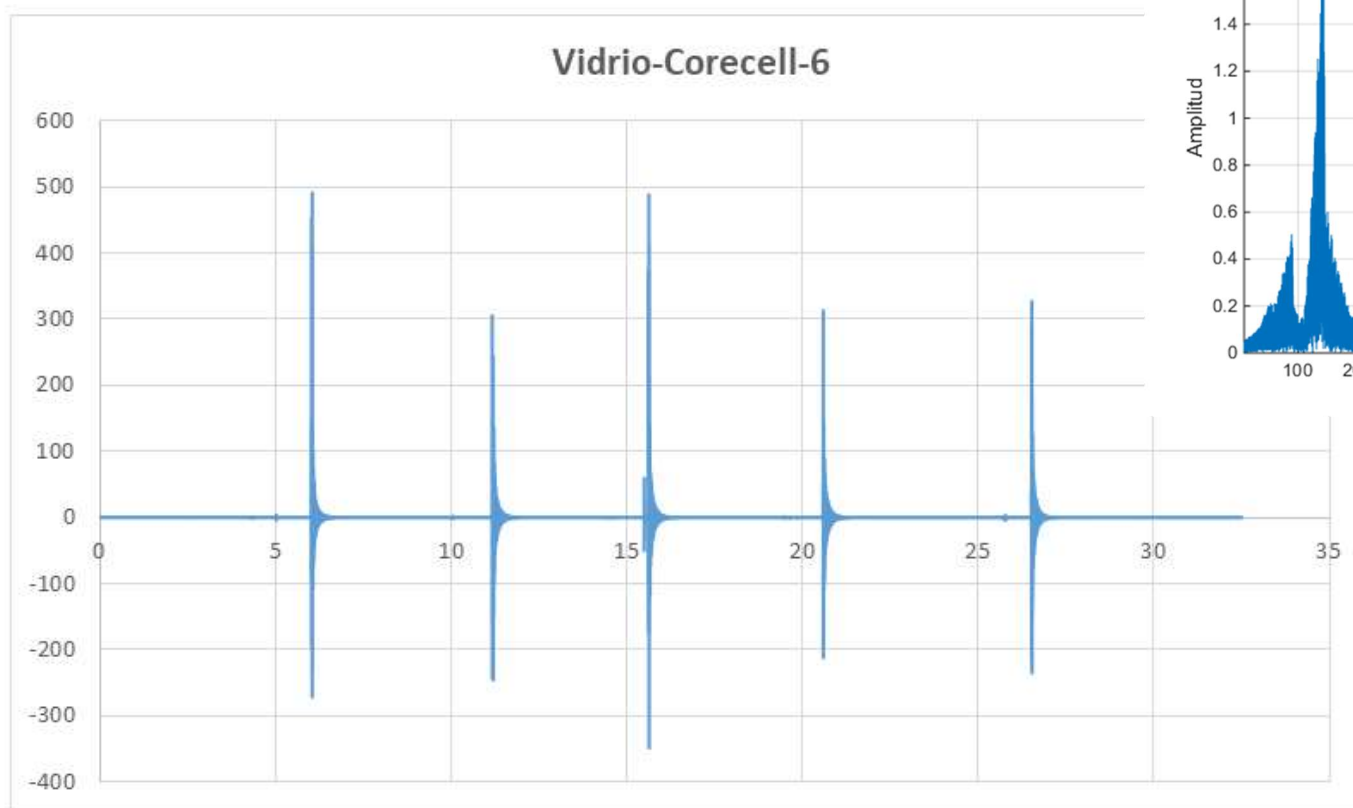
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	23,975098	18,70399
A10	24,092676	3,203024
δ	0,17646415	
ξ	0,02807407	



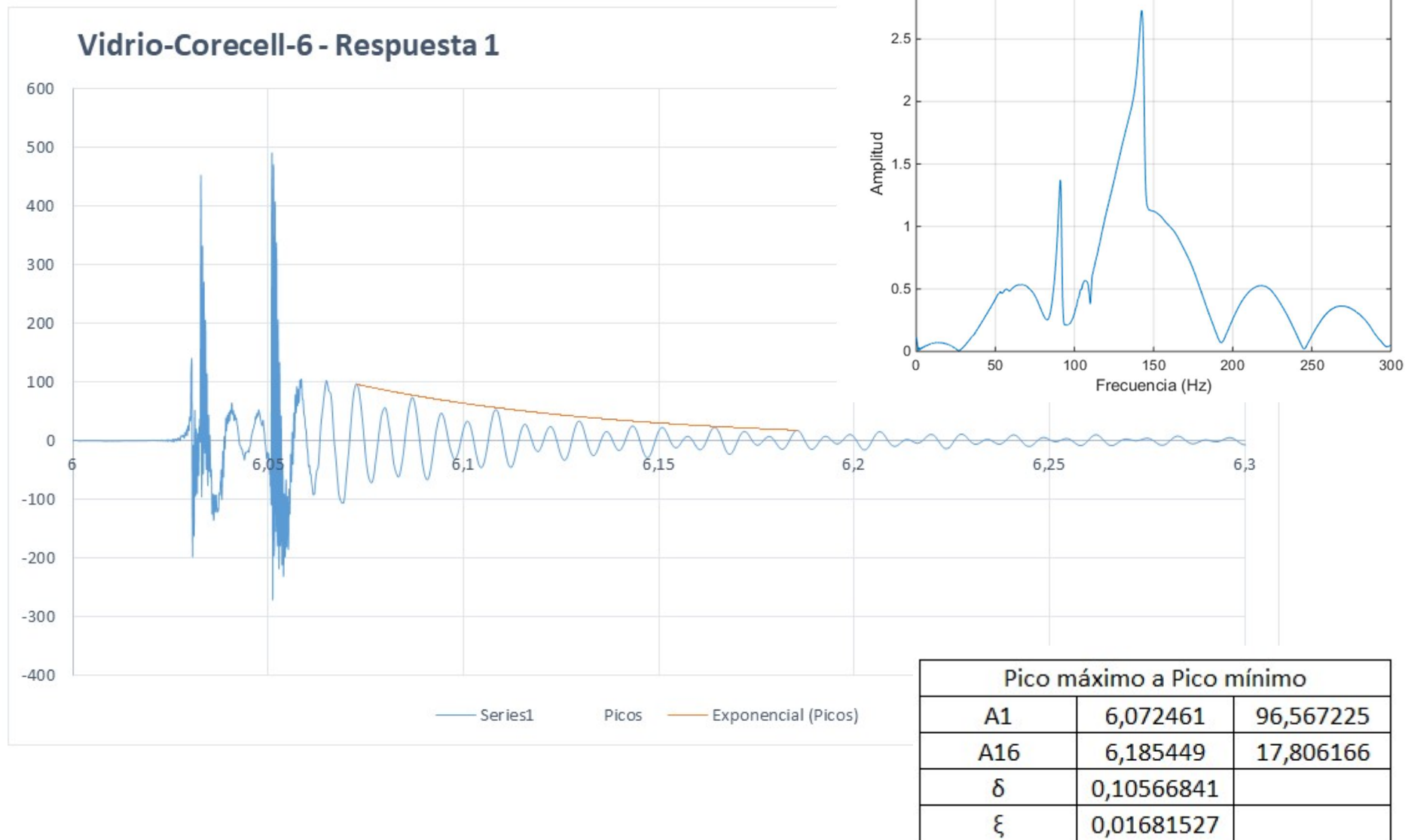
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	28,218945	28,551907
A13	28,359277	3,384666
δ	0,16403604	
ξ	0,02609825	

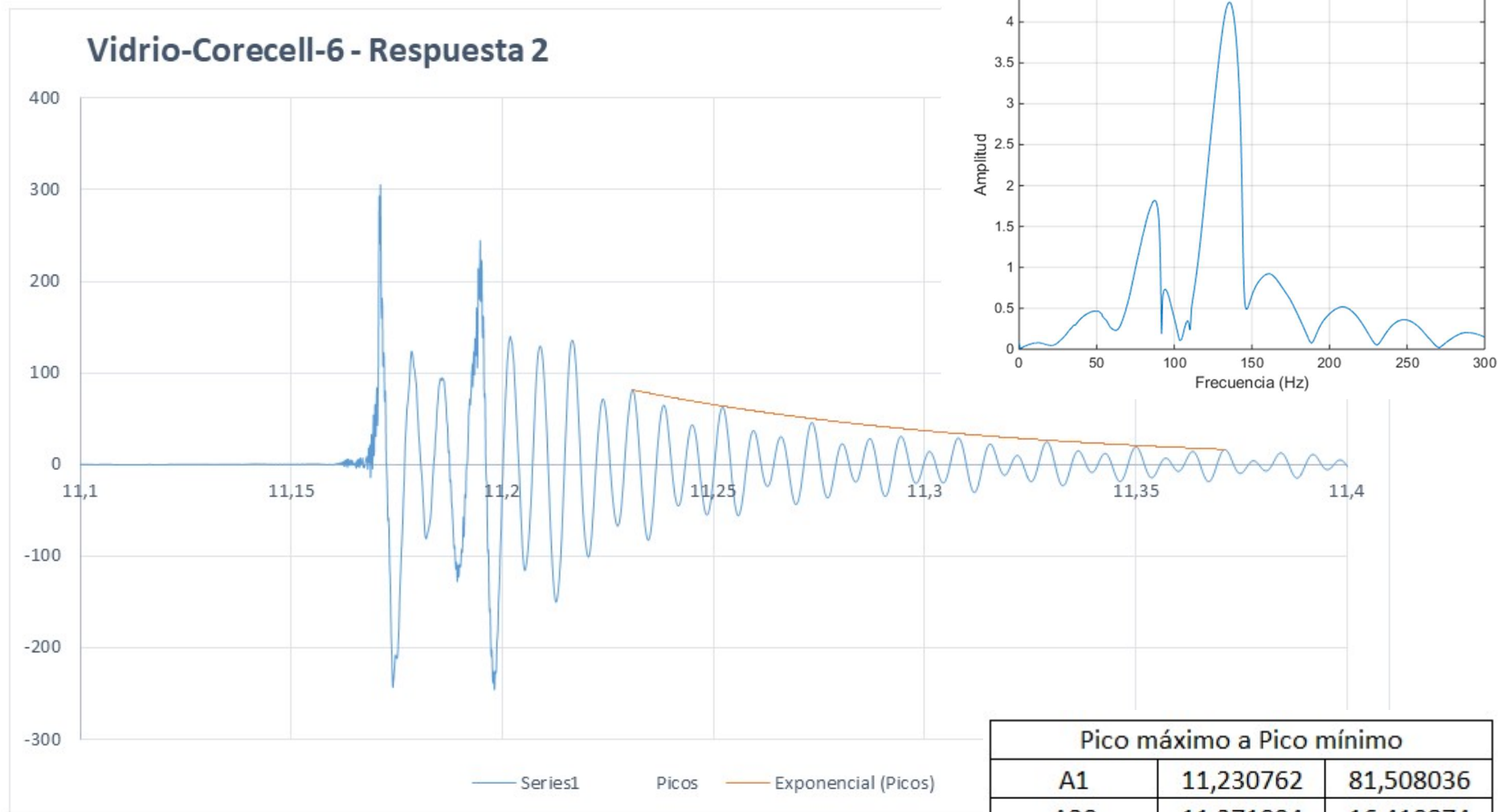


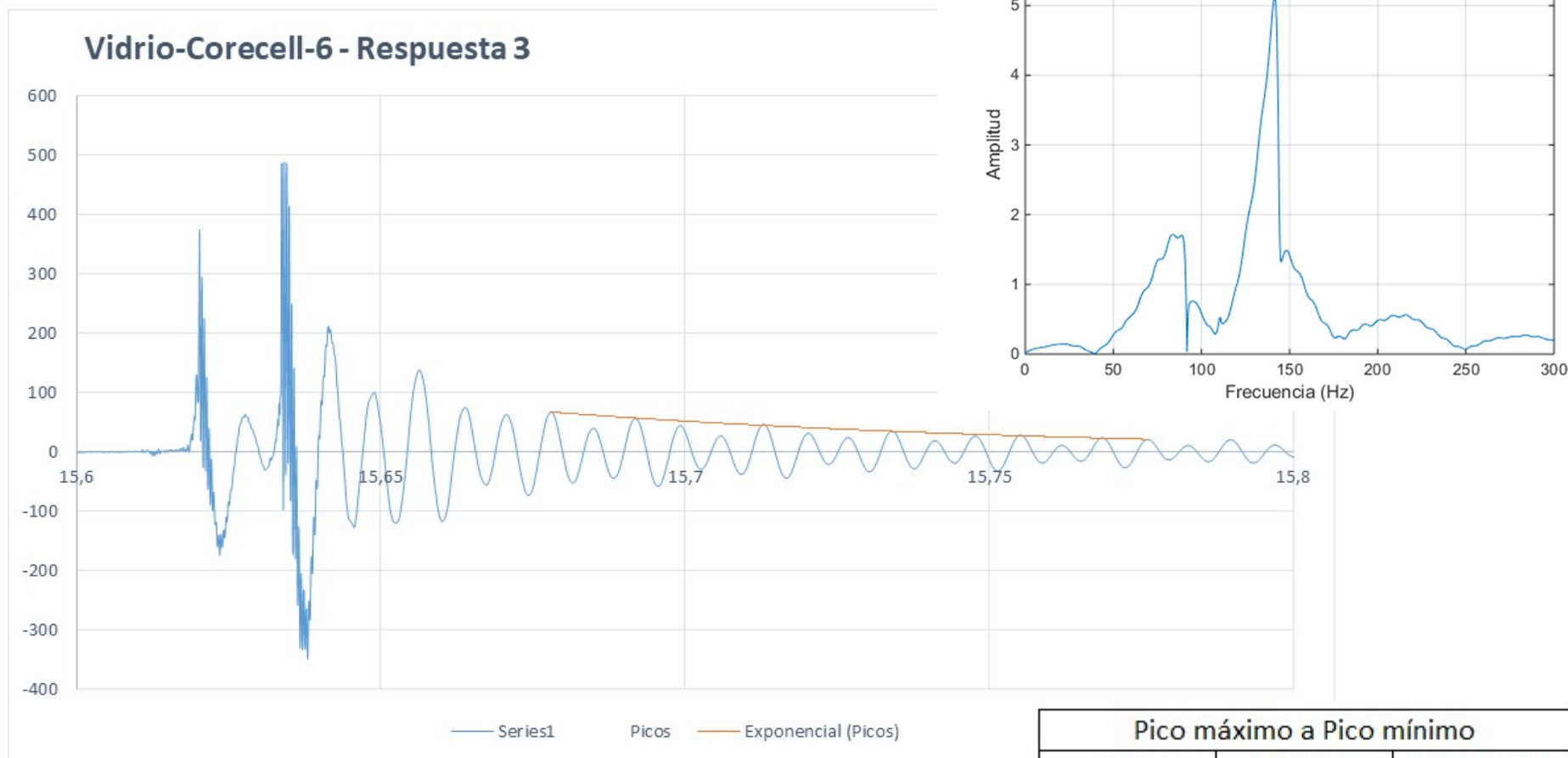




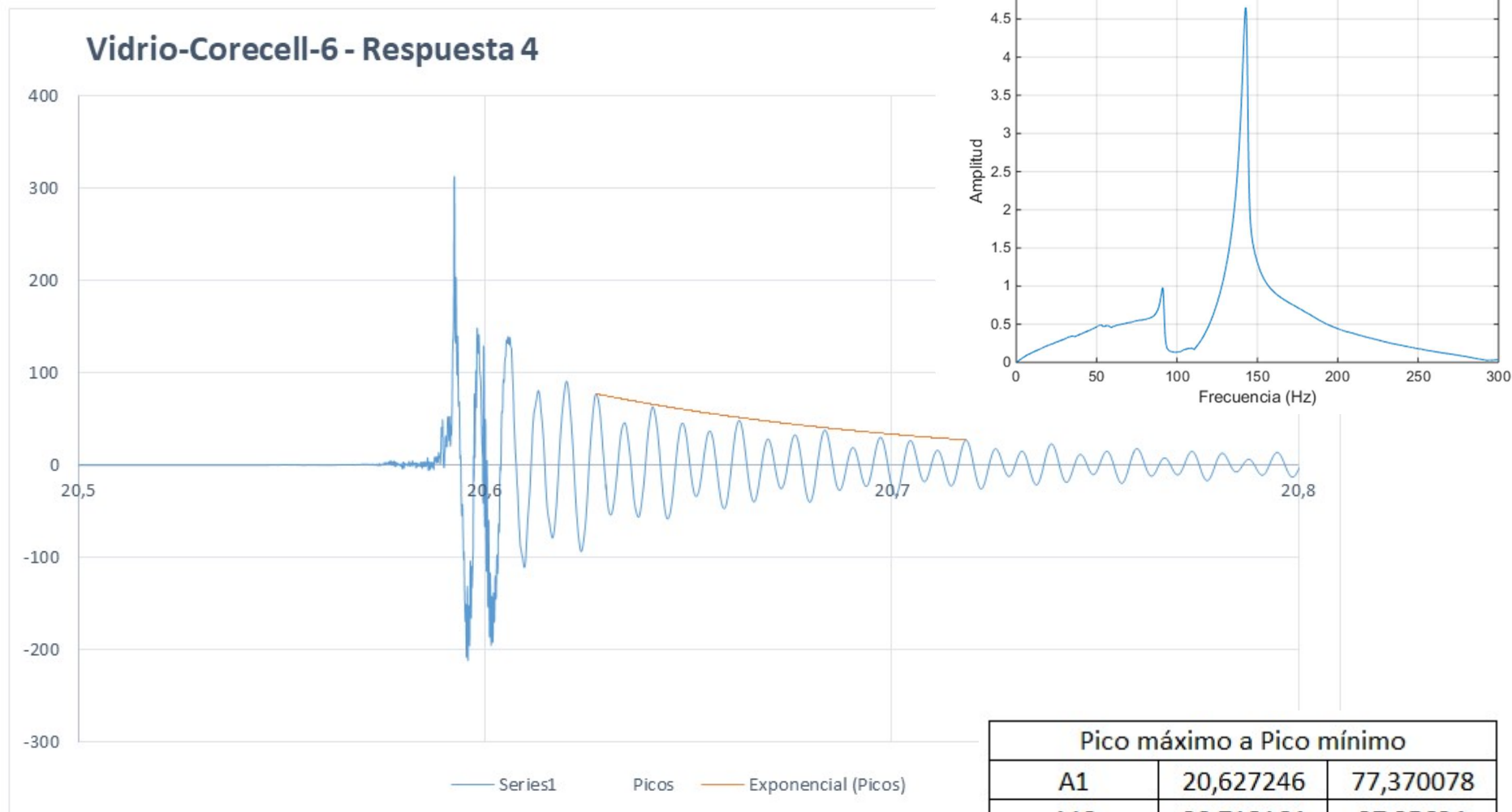
Channels	1
Samples	332800
Date	26/03/2018
Time	19:28:35
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	19:22,0
Delta_X	9,77E-05

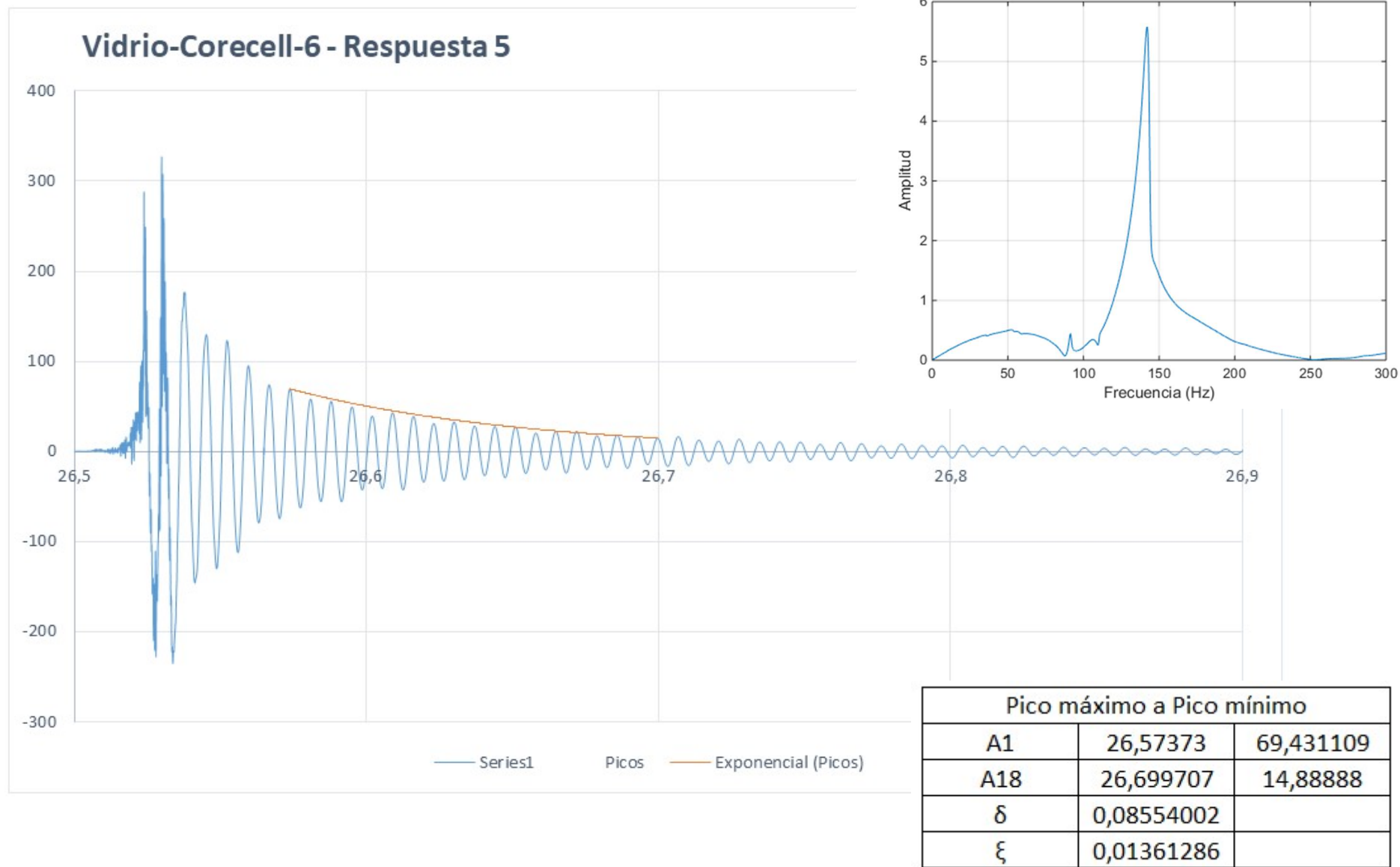


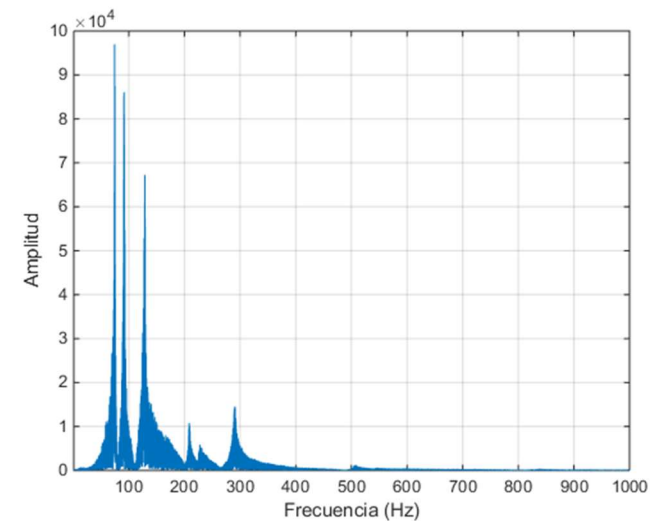
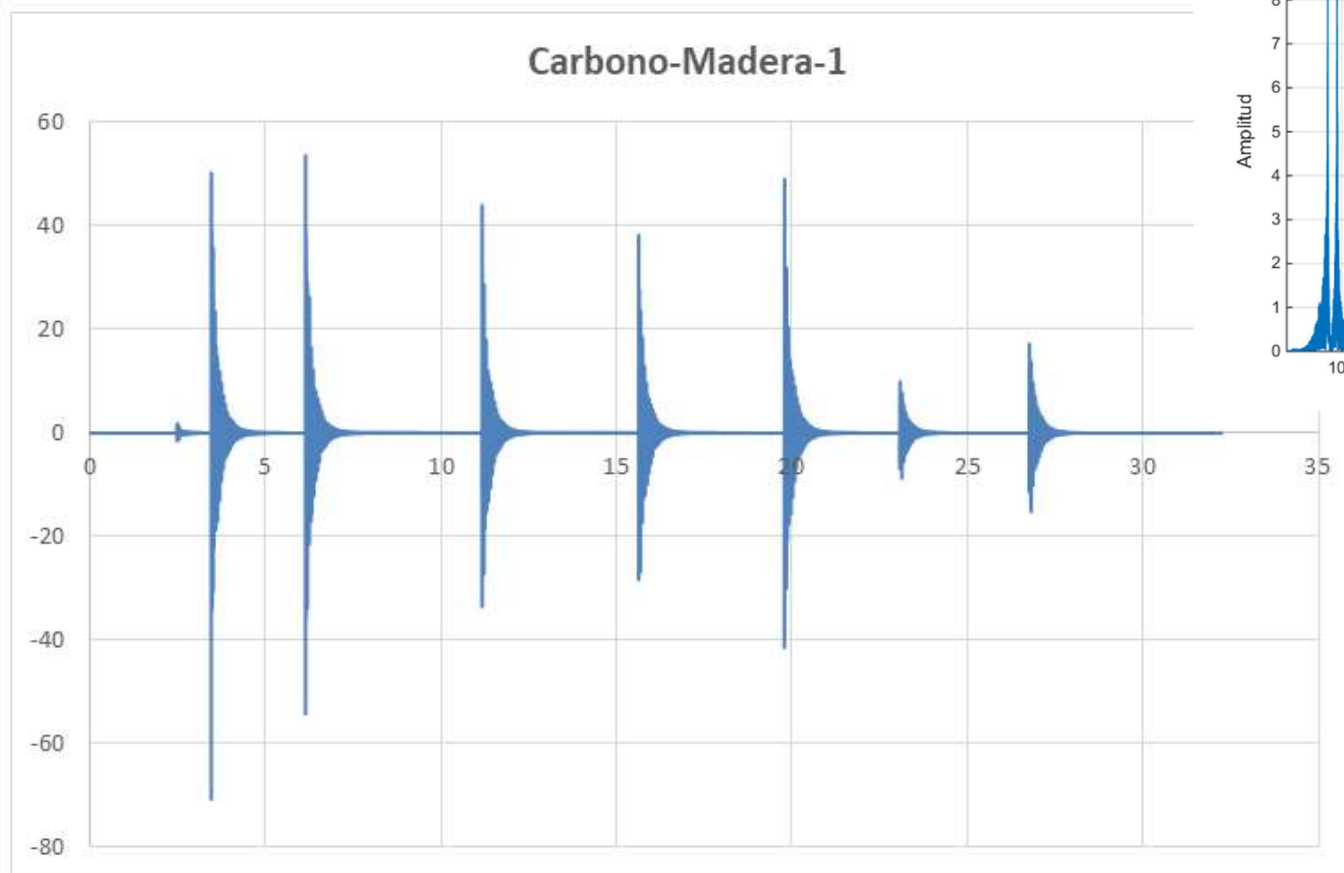




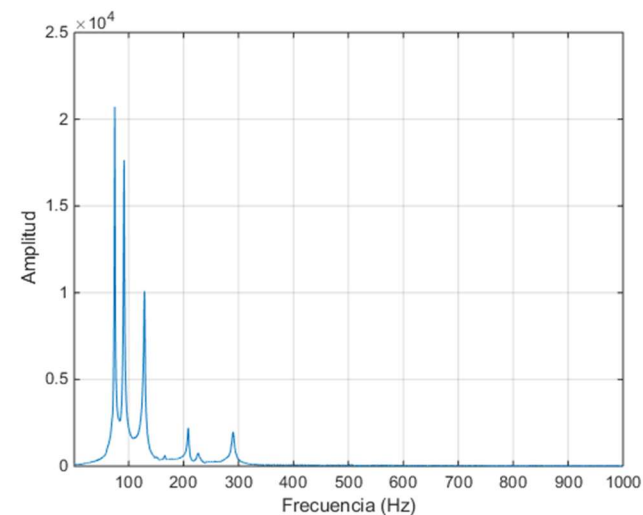
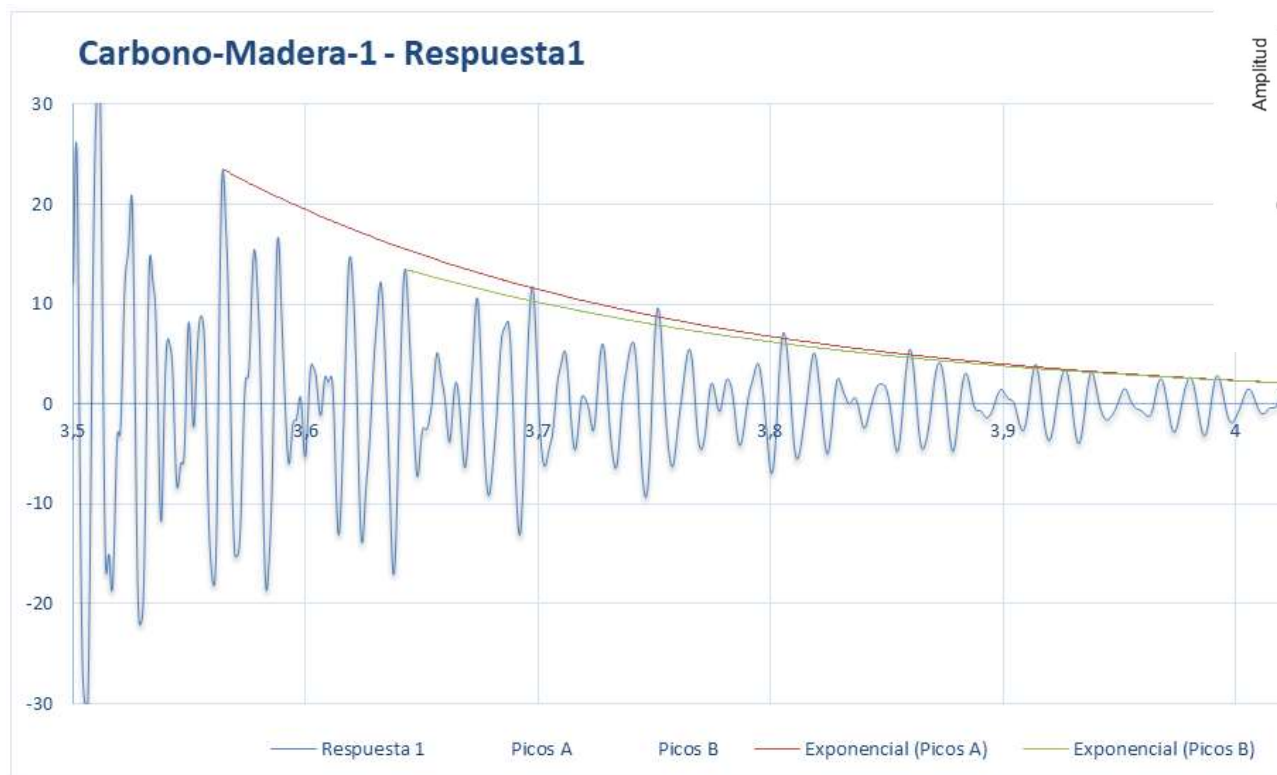
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	15,67793	67,313195
A14	15,776074	21,279633
δ	0,08225756	
ξ	0,01309058	



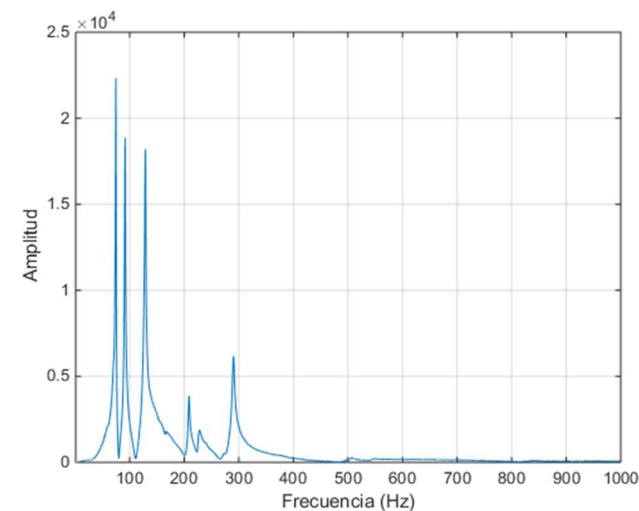
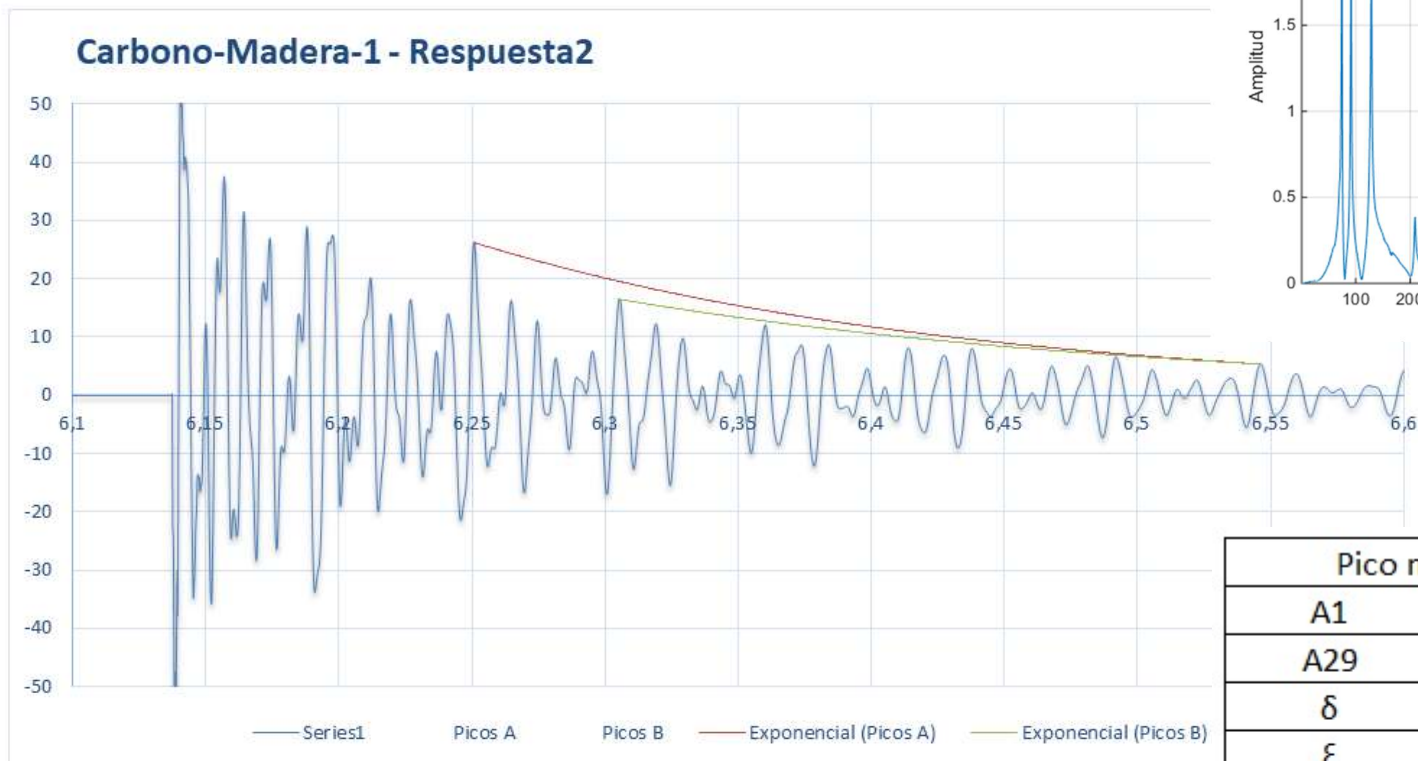




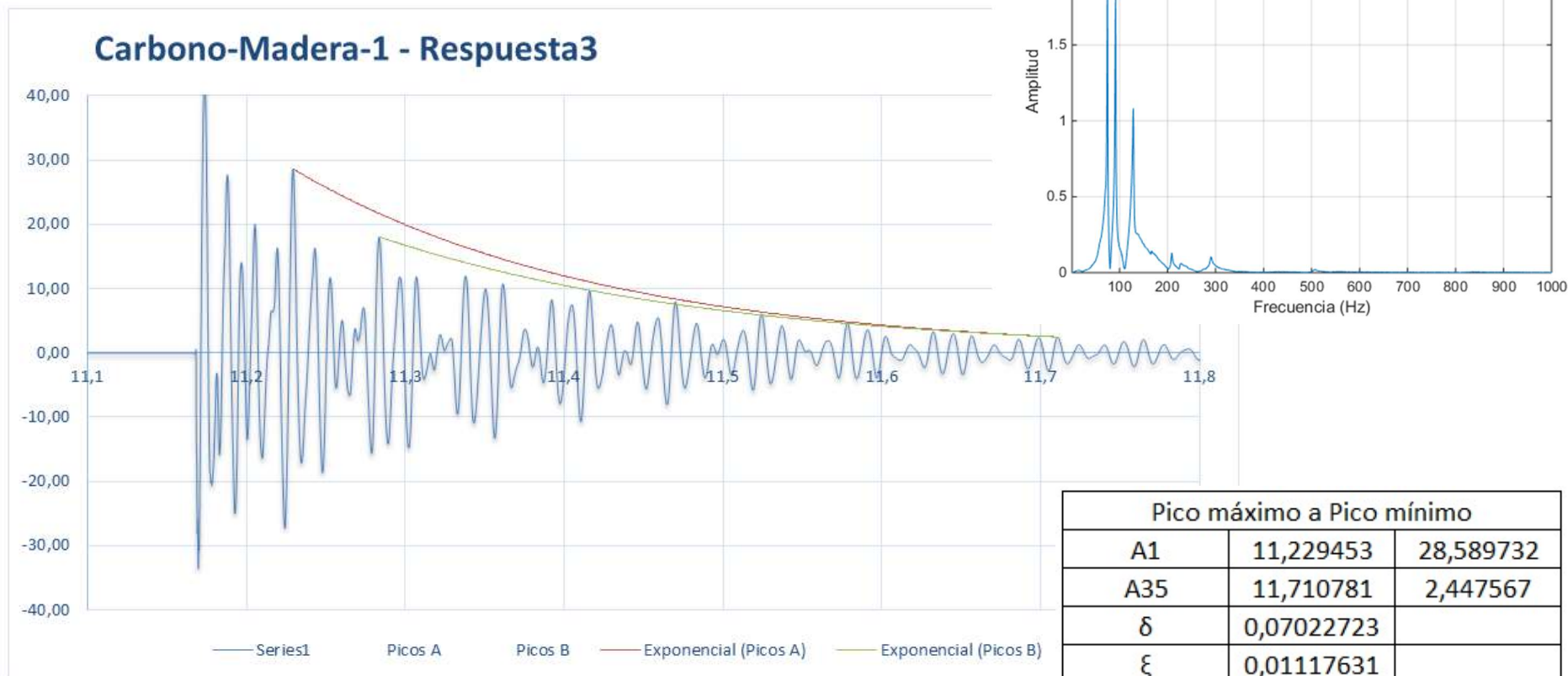
Channels	1
Samples	412500
Date	03/05/2018
Time	17:01:34
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	17:00,3
Delta_X	7,81E-05



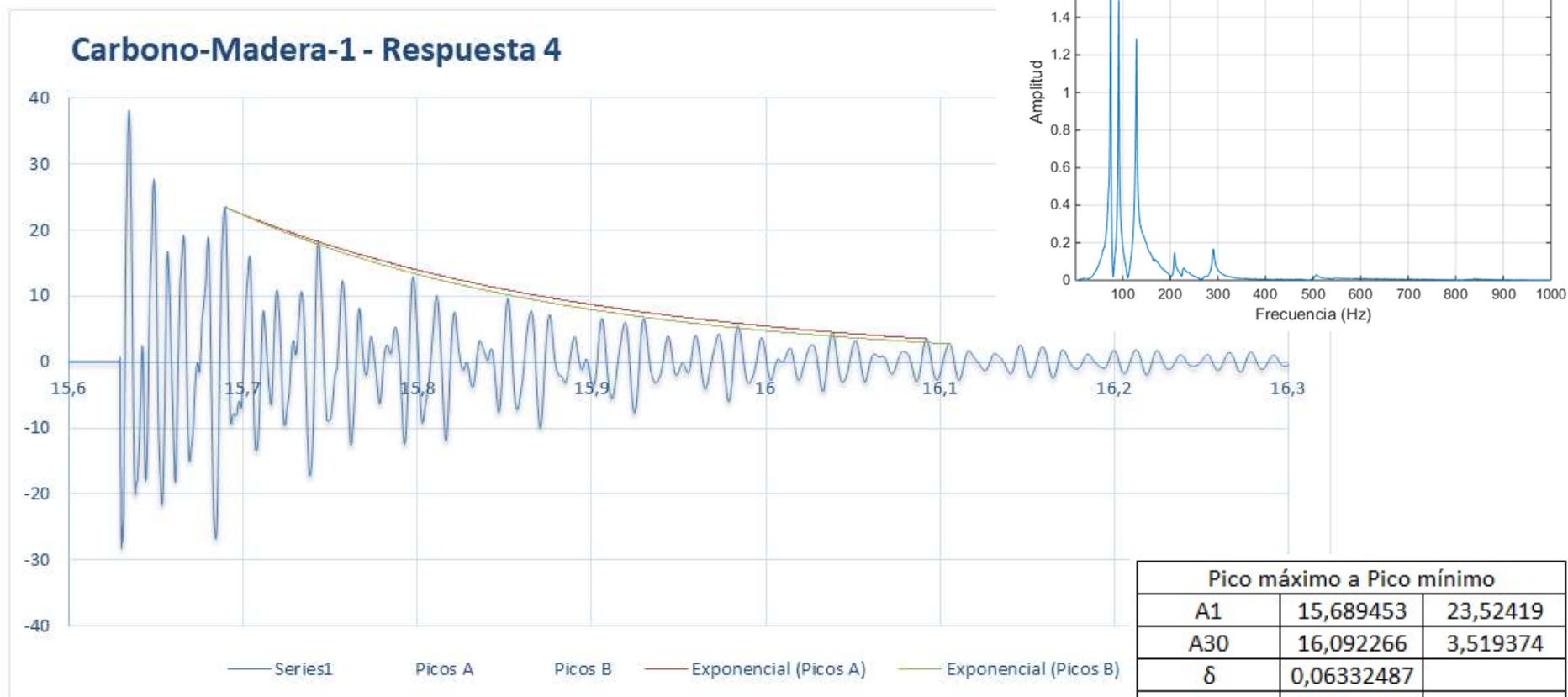
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	3,564375	23,479868
A30	4,03375	1,966864
δ	0,08265677	
ξ	0,01315409	
B1	3,642734	13,499563
B	4,03375	1,966864
δ	0,08025904	
ξ	0,01277258	



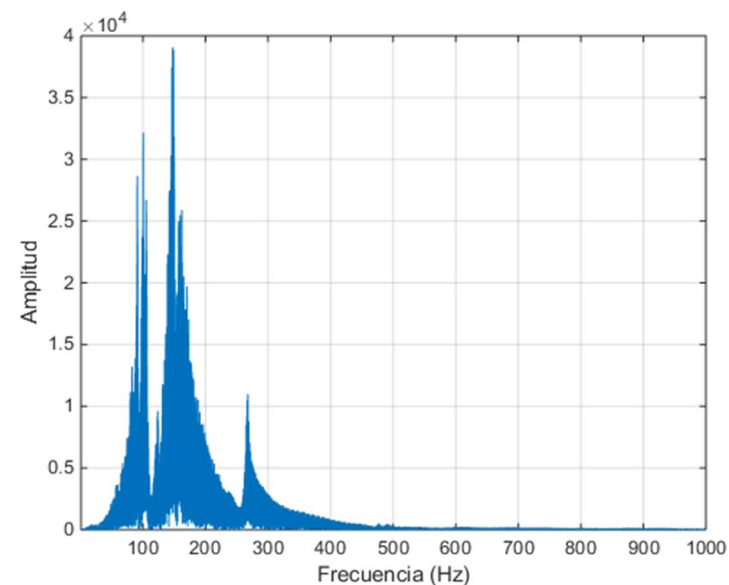
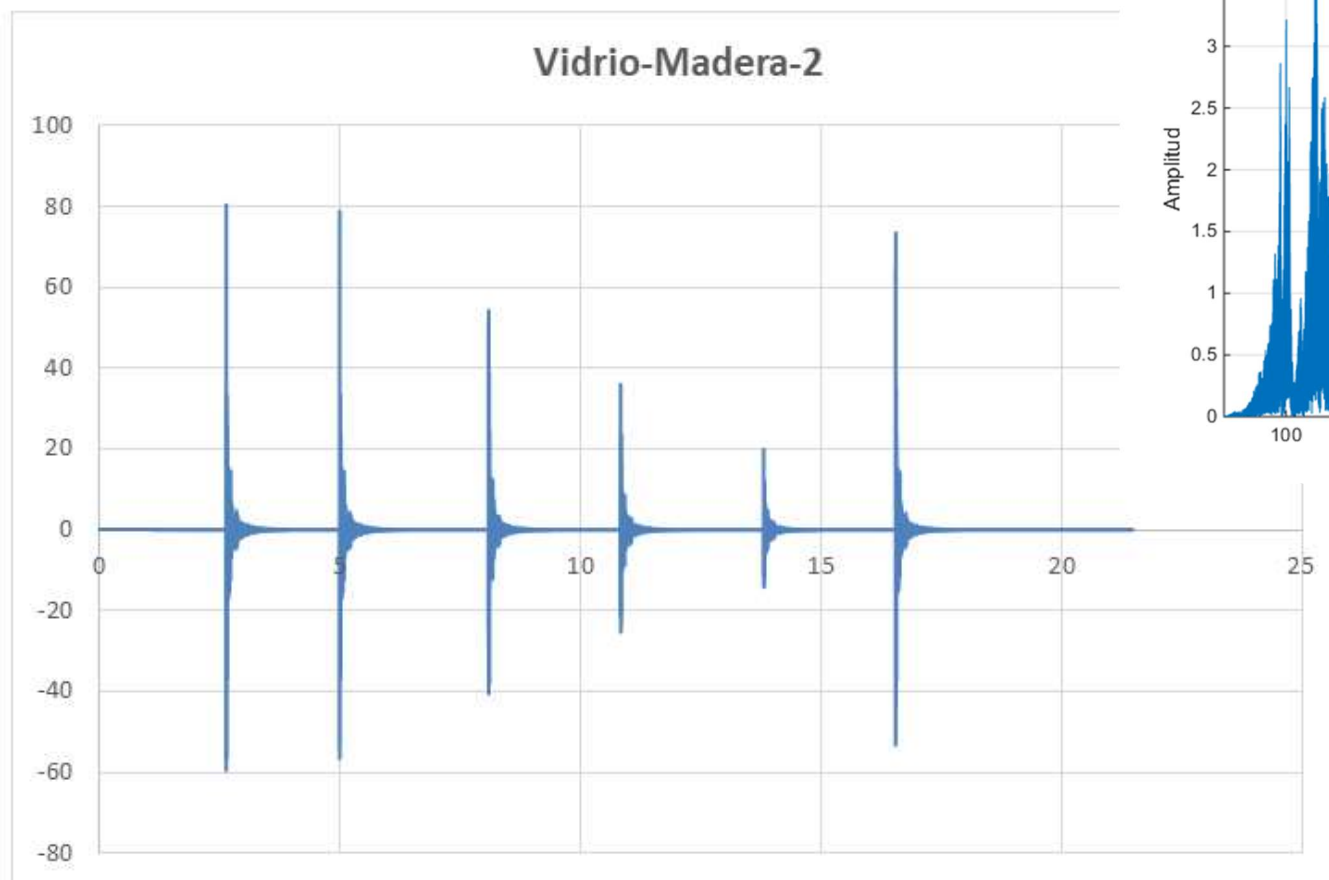
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	6,250703	26,235064
A29	6,546172	5,34571
δ	0,05485526	
ξ	0,00873015	
B1	6,305234	16,473587
B23	6,546172	5,34571
δ	0,04893321	
ξ	0,00778773	



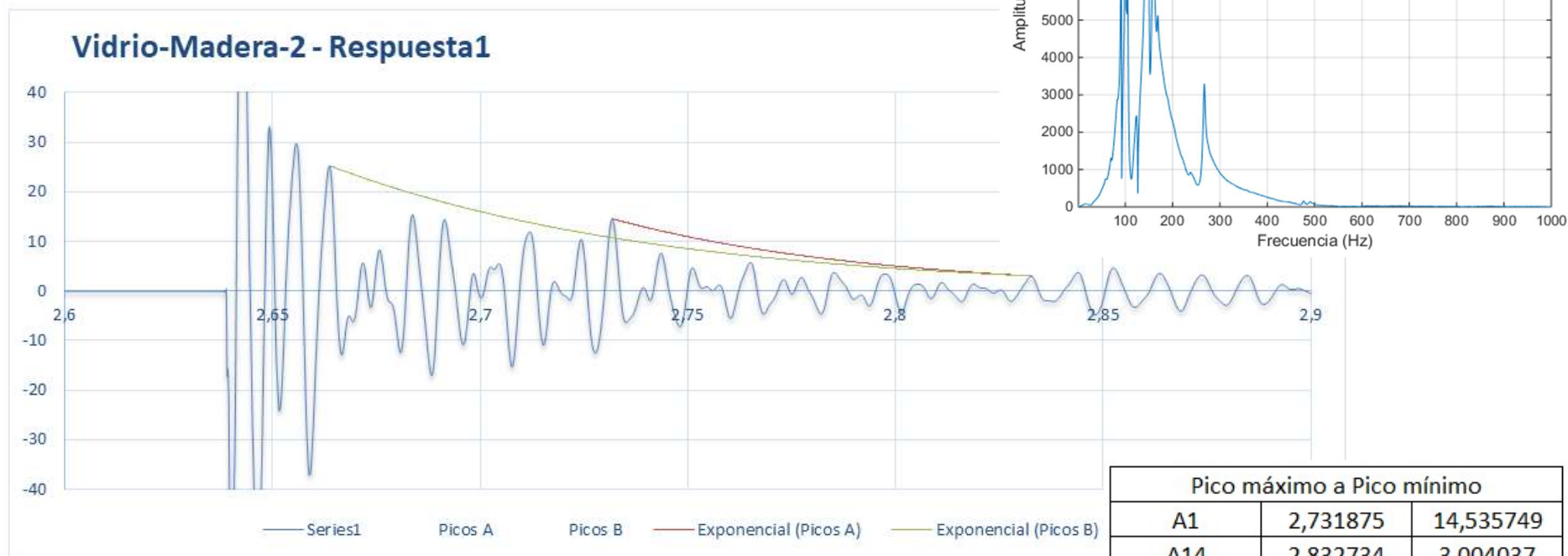
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	11,229453	28,589732
A35	11,710781	2,447567
δ	0,07022723	
ξ	0,01117631	
B1	11,28375	18,068969
B31	11,710781	2,447567
δ	0,06448715	
ξ	0,01026291	



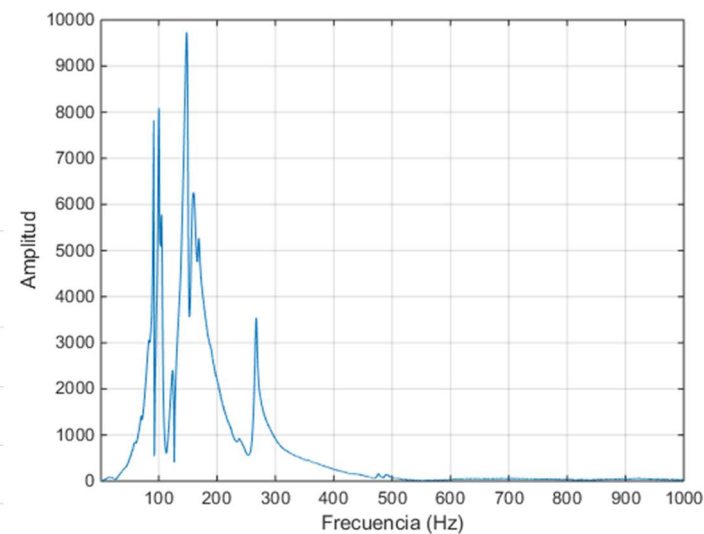
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	15,689453	23,52419
A30	16,092266	3,519374
δ	0,06332487	
ξ	0,01007795	
B1	15,689453	23,52419
B31	16,105391	2,760436
δ	0,06911744	
ξ	0,01099972	



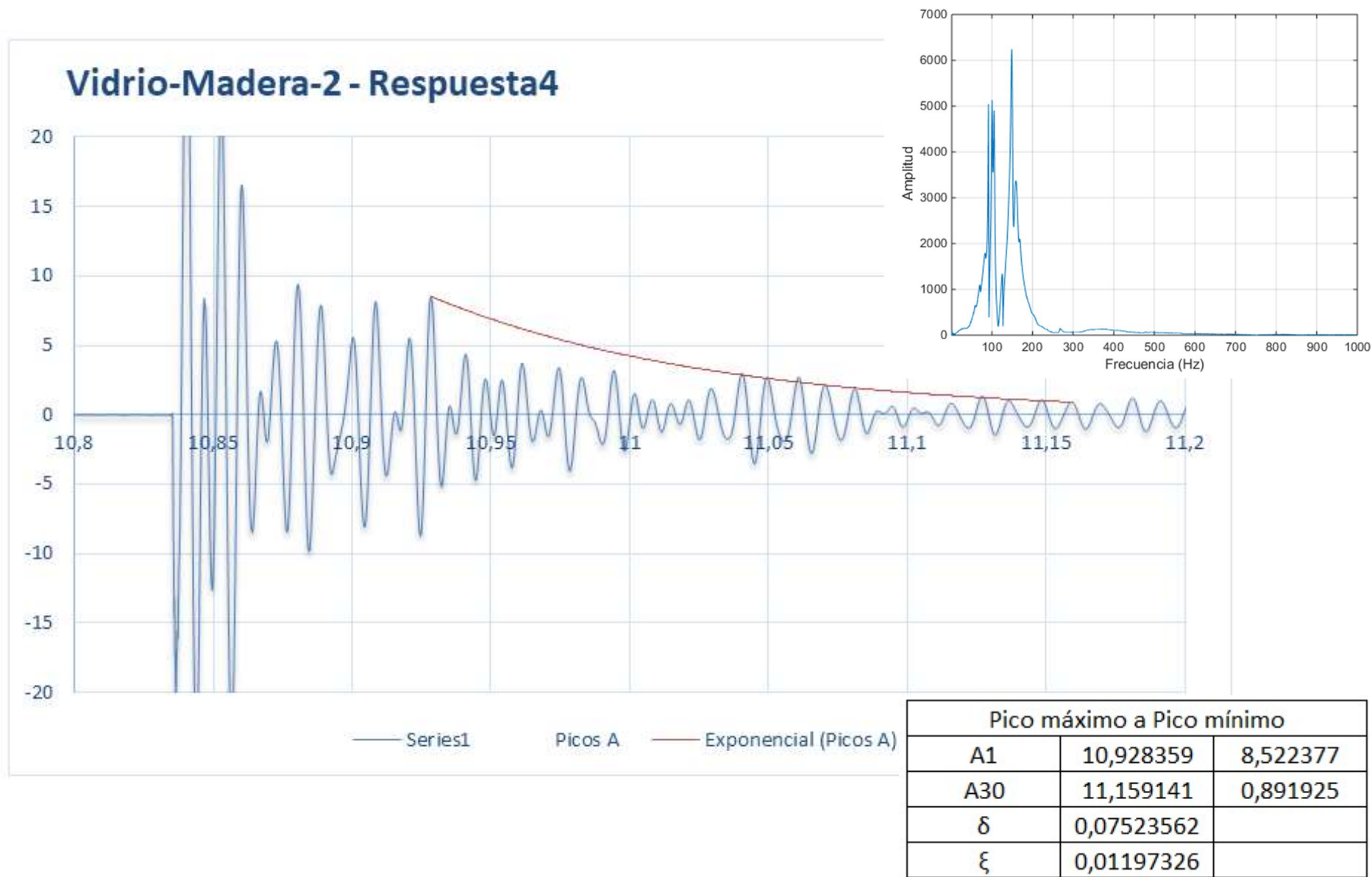
Channels	1
Samples	275000
Date	03/05/2018
Time	17:07:35
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	17:06,7
Delta_X	7,81E-05

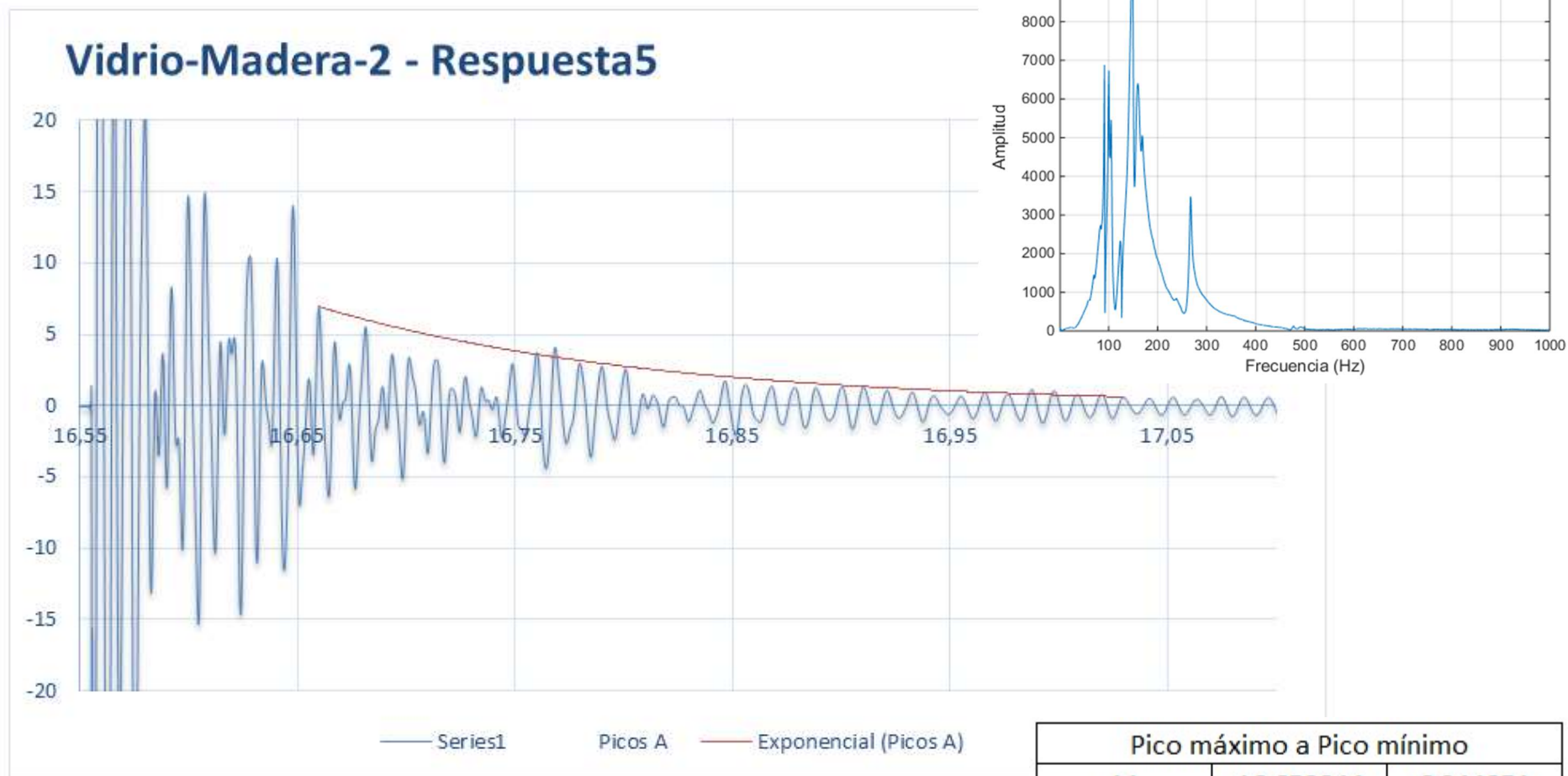


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	2,731875	14,535749
A14	2,832734	3,004037
δ	0,11261814	
ξ	0,01792086	
B1	2,663828	25,258168
B22	2,832734	3,004037
δ	0,09678148	
ξ	0,01540142	

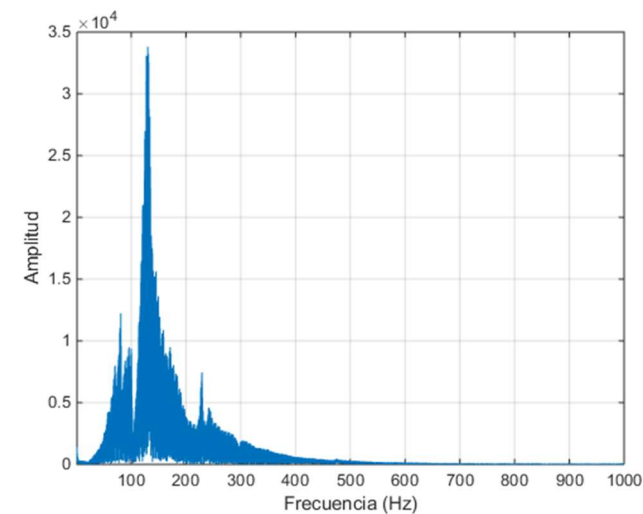
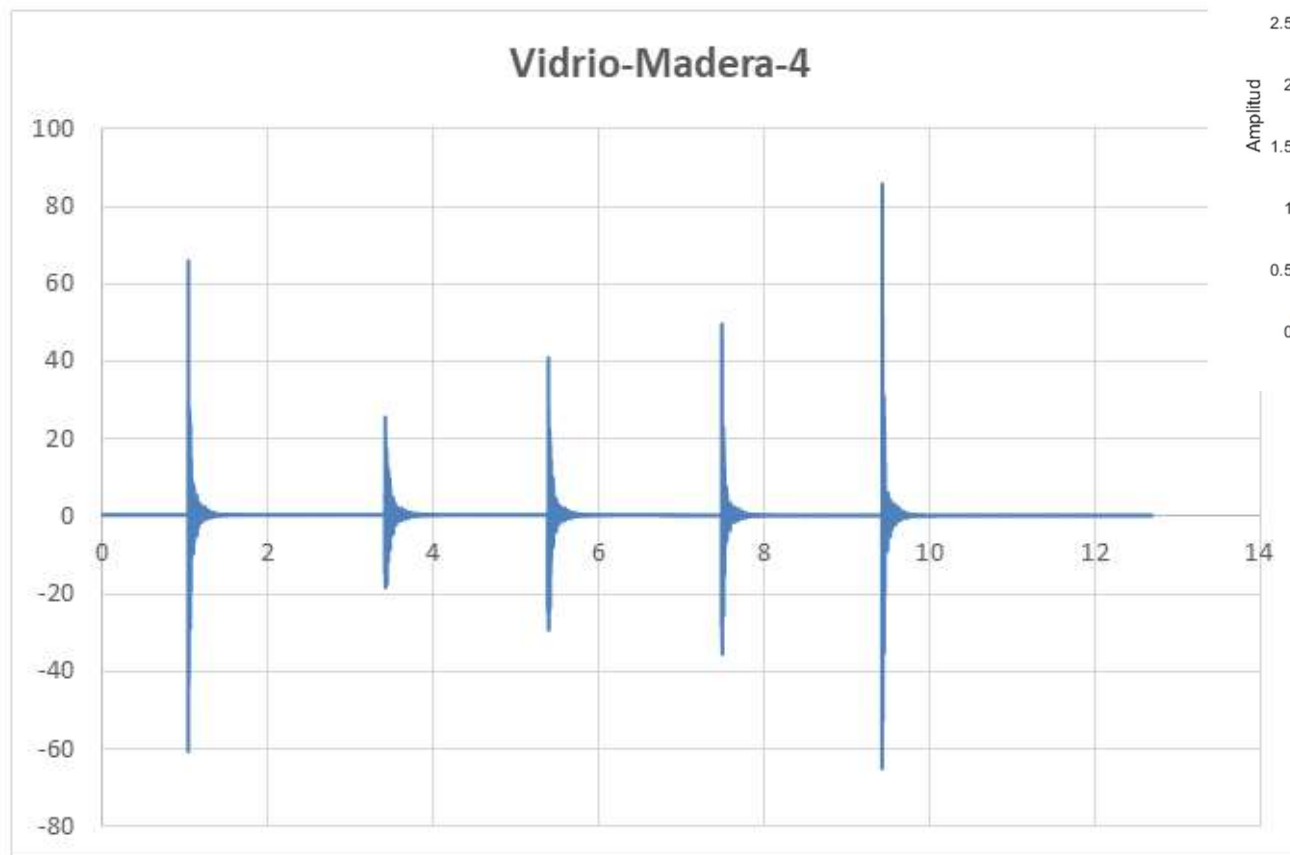


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	5,012812	33,423565
A25	5,200937	4,006111
δ	0,08485761	
ξ	0,01350428	
B1	5,020781	24,284926
B24	5,200937	4,006111
δ	0,07508479	
ξ	0,01194926	

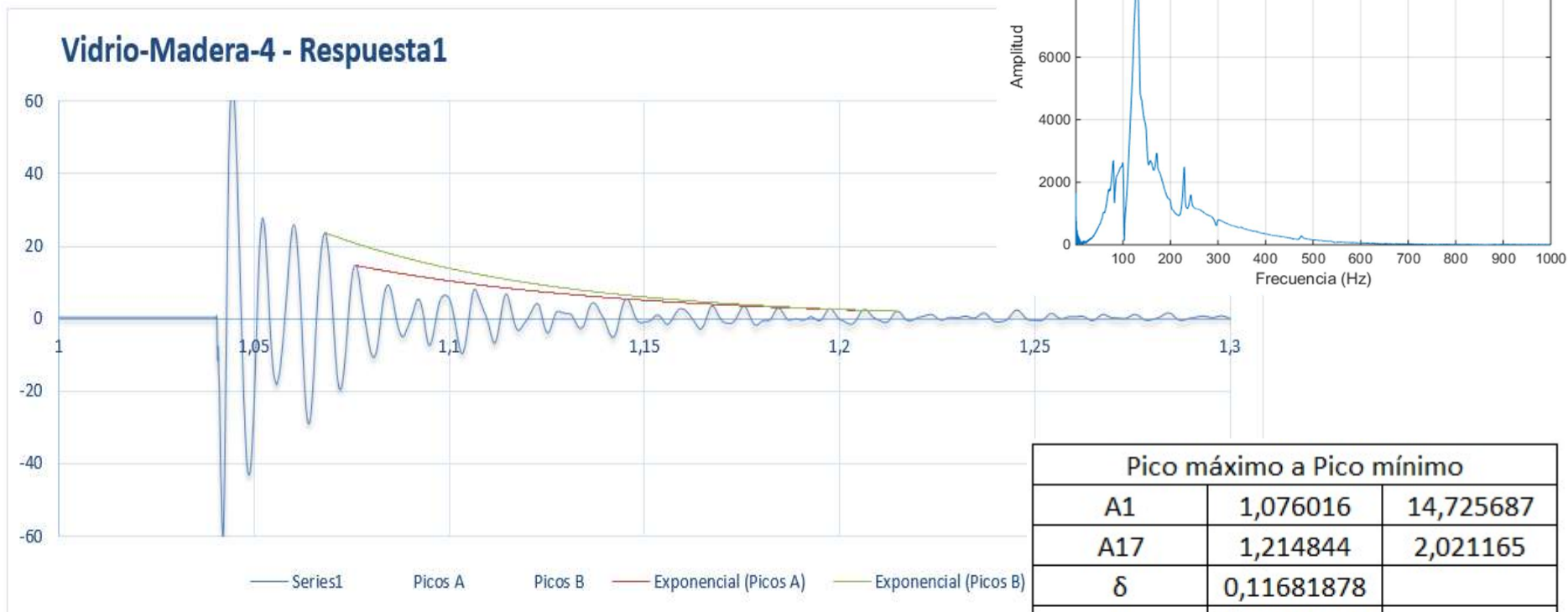




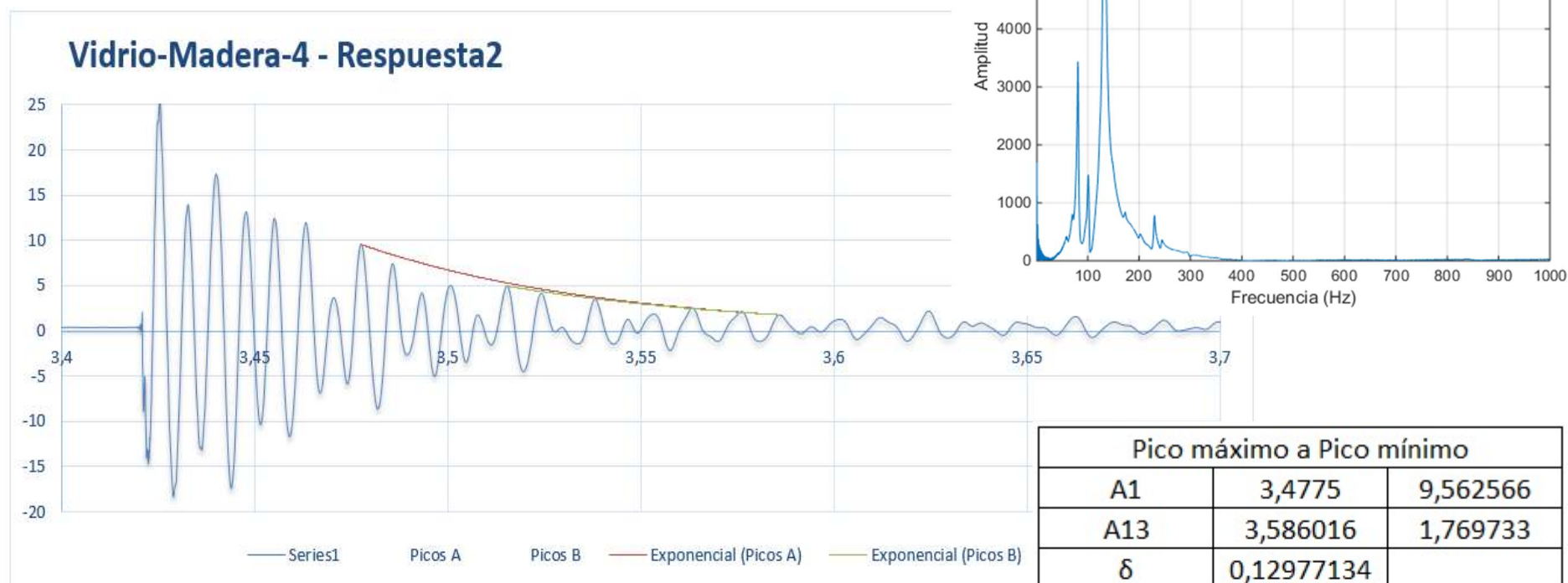
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	16,659844	6,944051
A	17,029844	0,610906
δ	0,06569453	
ξ	0,01045504	

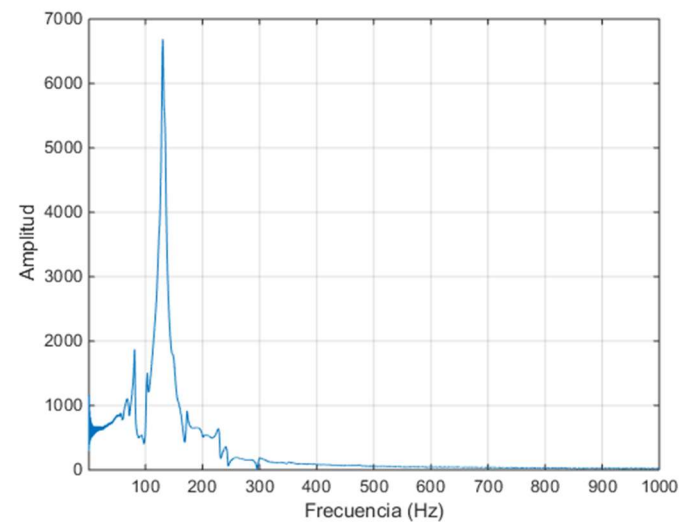


Channels	1
Samples	162500
Date	03/05/2018
Time	17:52:48
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	17:52,3
Delta_X	7,81E-05

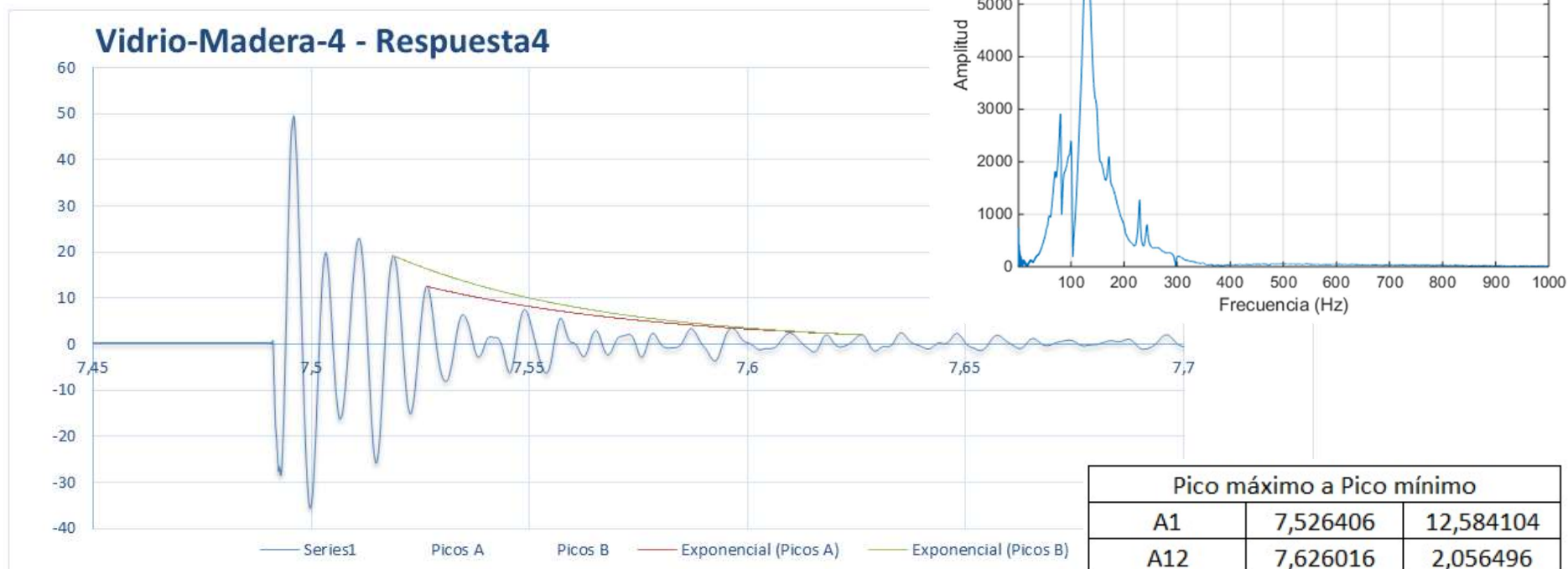


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	1,076016	14,725687
A17	1,214844	2,021165
δ	0,11681878	
ξ	0,01858907	
B1	1,068203	23,740582
B18	1,214844	2,021165
δ	0,13686177	
ξ	0,02177706	

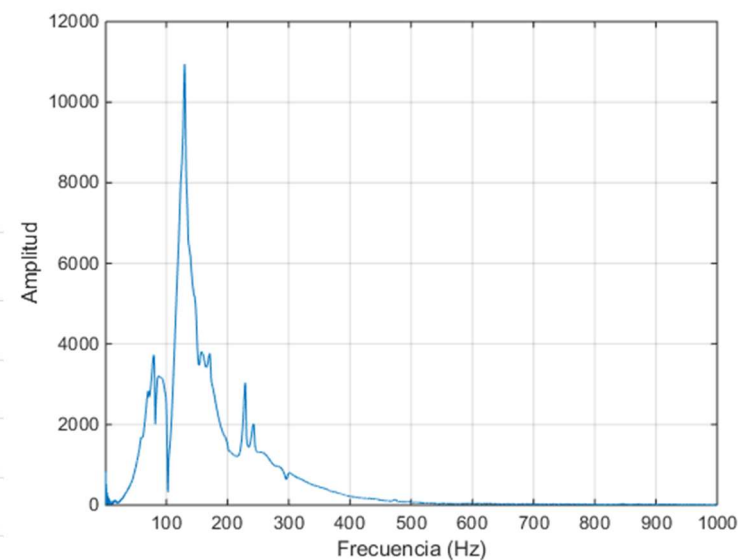




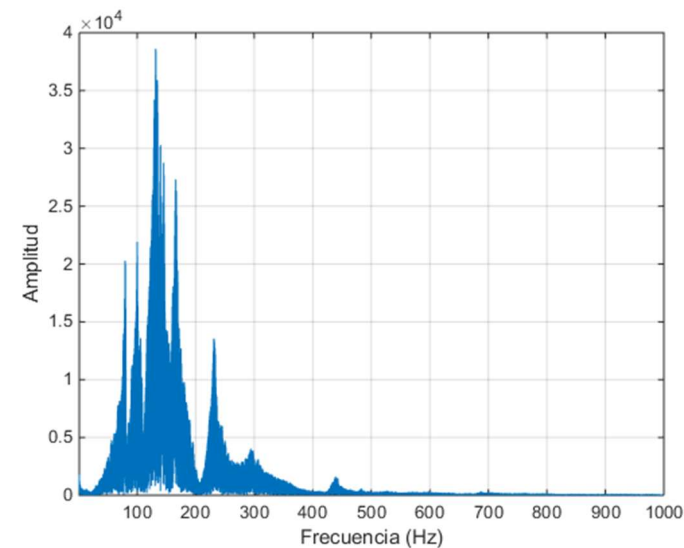
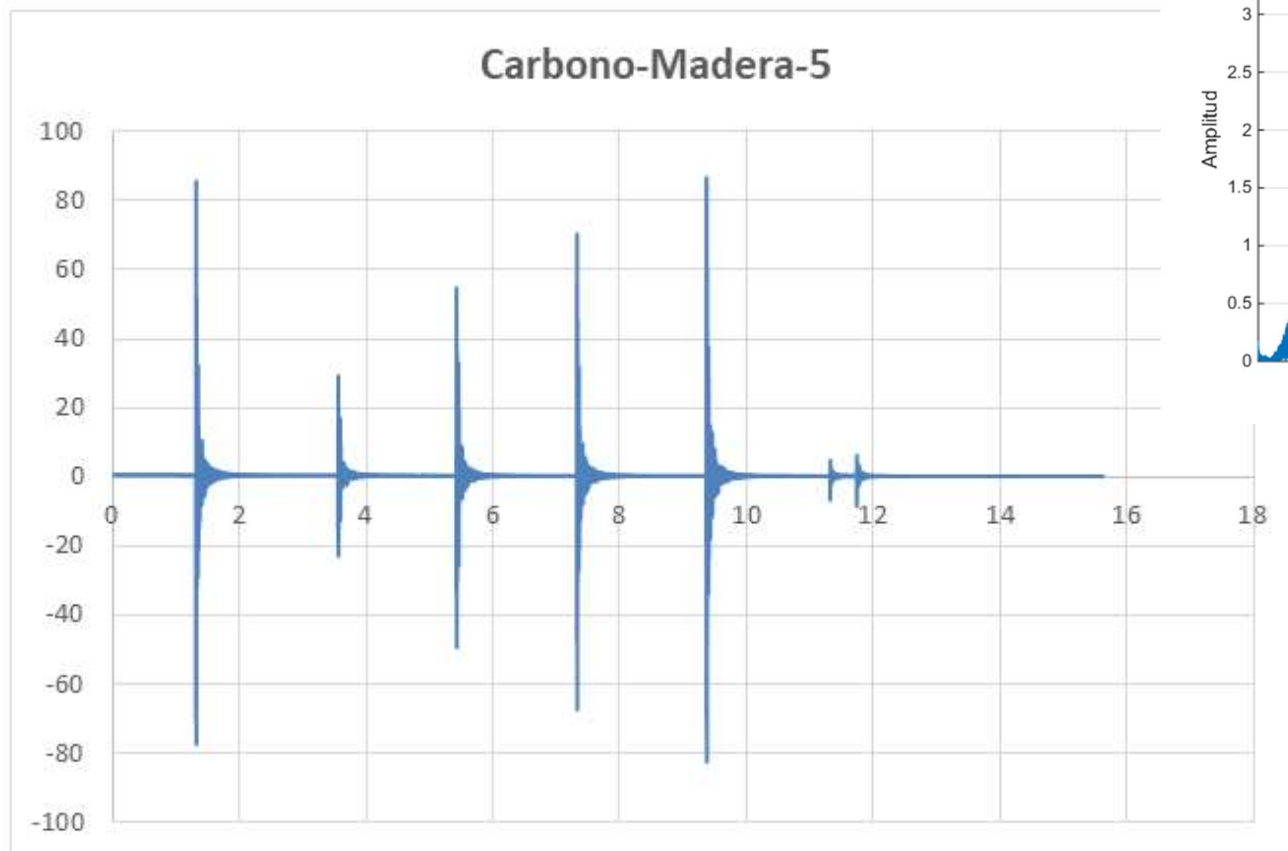
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	5,450469	10,049592
A22	5,635859	1,58931
δ	0,08382873	
ξ	0,01334057	
B1	5,488437	4,654242
B16	5,635859	1,58931
δ	0,06715494	
ξ	0,01068743	



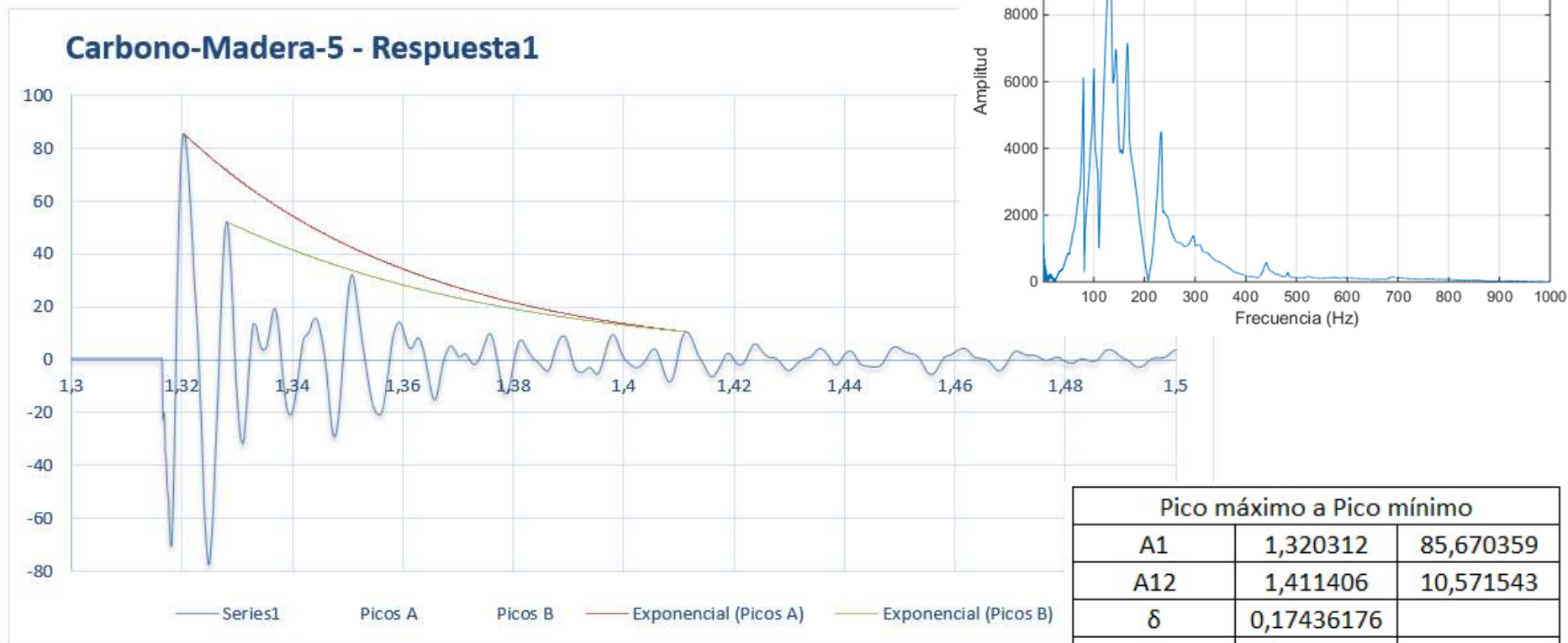
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	7,526406	12,584104
A12	7,626016	2,056496
δ	0,15095257	
ξ	0,02401792	
B1	7,518672	19,270379
B13	7,626016	2,056496
δ	0,17212043	
ξ	0,02738354	

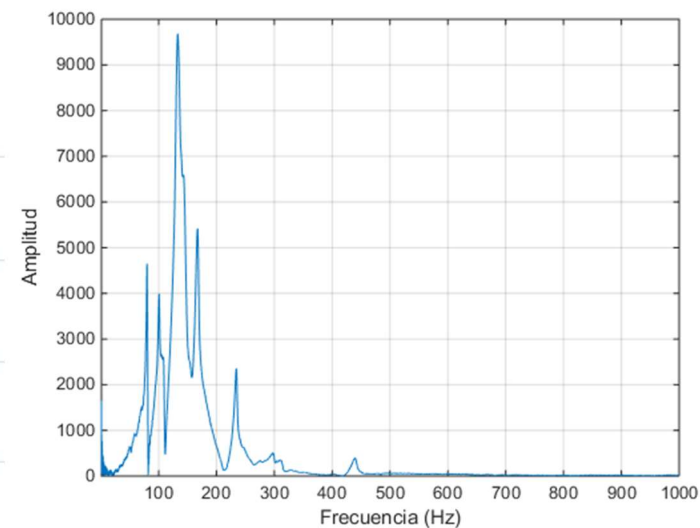


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	9,459219	25,506177
A11	9,536719	4,182415
δ	0,16436653	
ξ	0,0261508	
B1	9,466719	13,735621
B10	9,536719	4,182415
δ	0,09146952	
ξ	0,01455628	

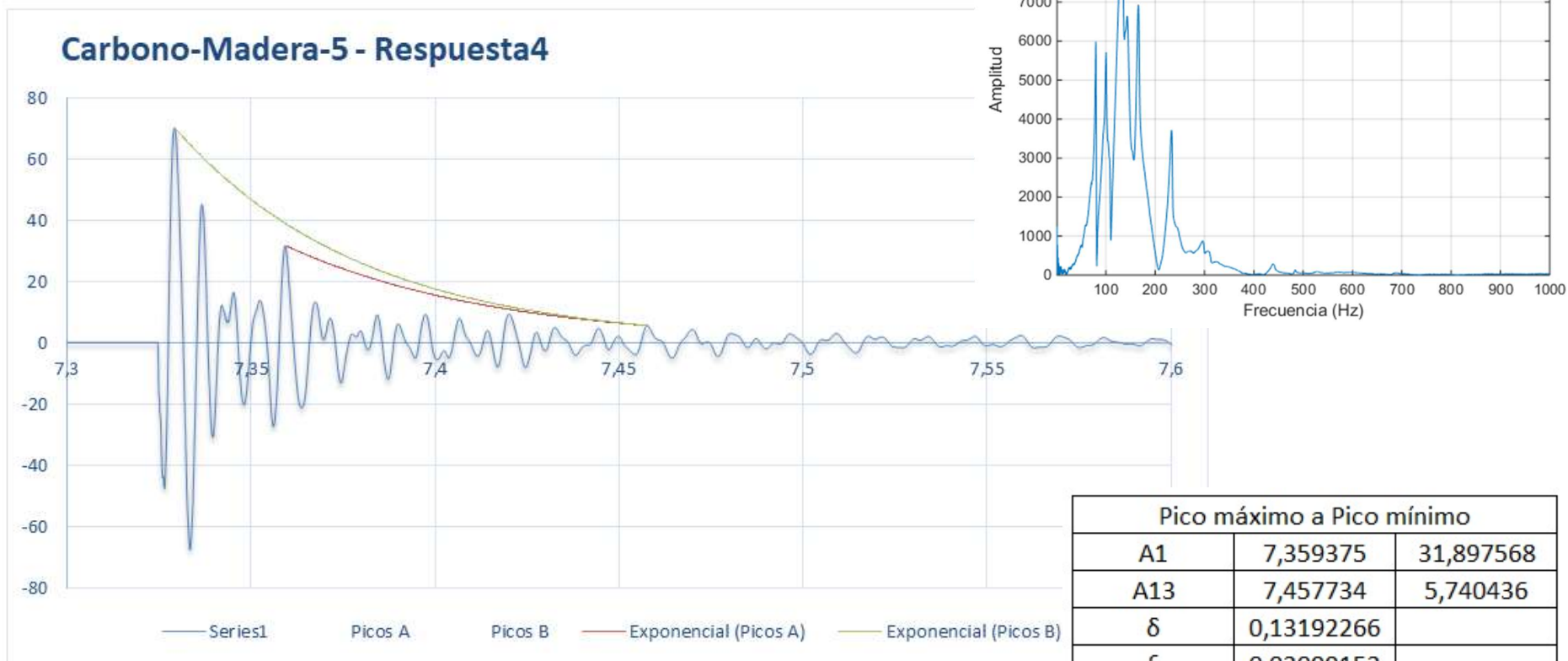


Channels	1
Samples	200000
Date	03/05/2018
Time	17:38:43
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s^2)
X_Dimension	Time (s)
X0	17:38,3
Delta_X	7,81E-05

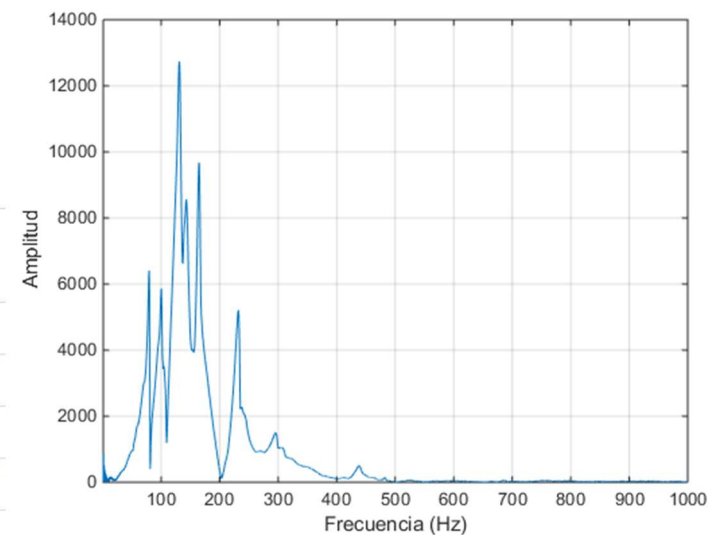
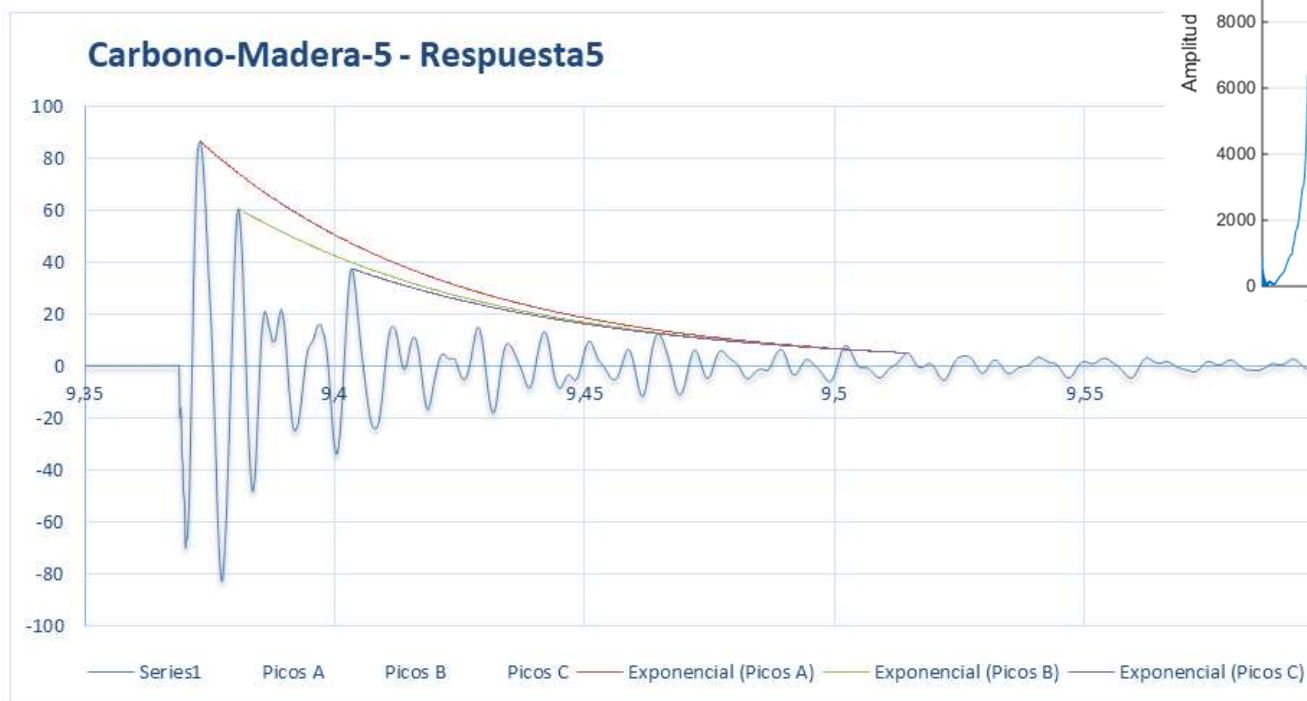




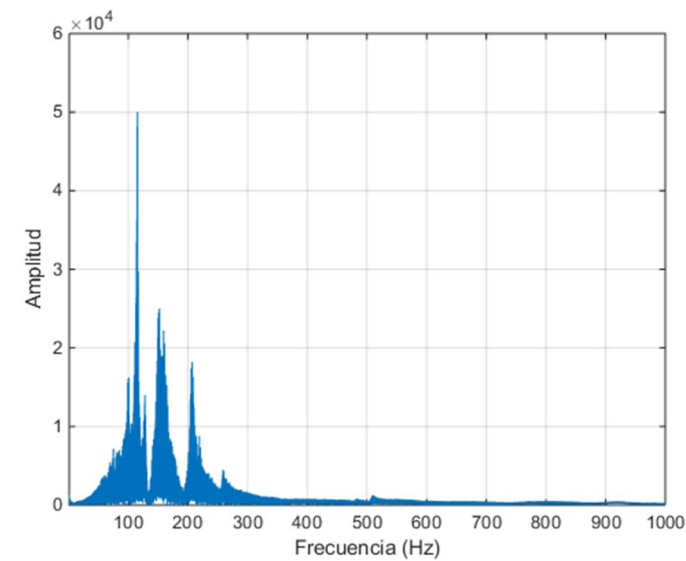
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	5,466328	19,093147
A18	5,595625	2,975842
δ	0,1032668	
ξ	0,0164332	
B1	5,458594	32,896799
B19	5,595625	2,975842
δ	0,1264657	
ξ	0,02012357	



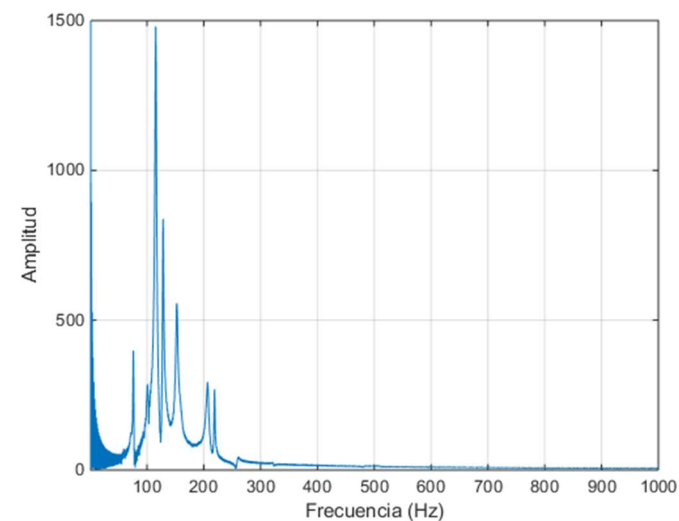
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	7,359375	31,897568
A13	7,457734	5,740436
δ	0,13192266	
ξ	0,02099152	
B1	7,329297	70,391413
B17	7,457734	5,740436
δ	0,1474433	
ξ	0,02345987	



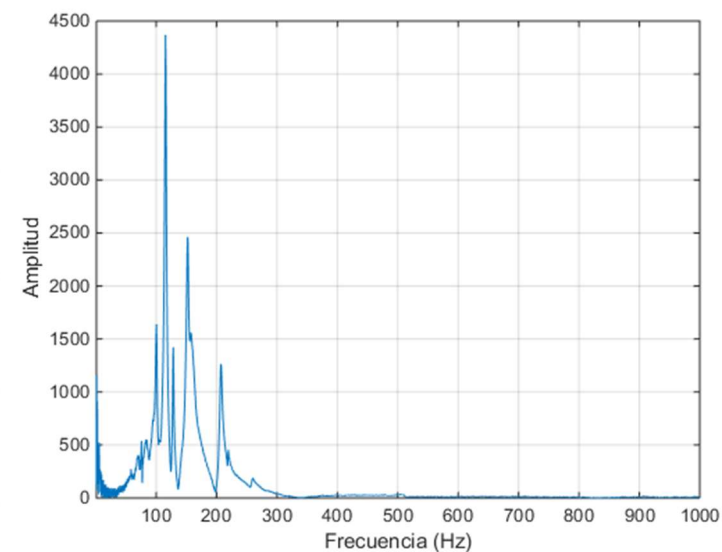
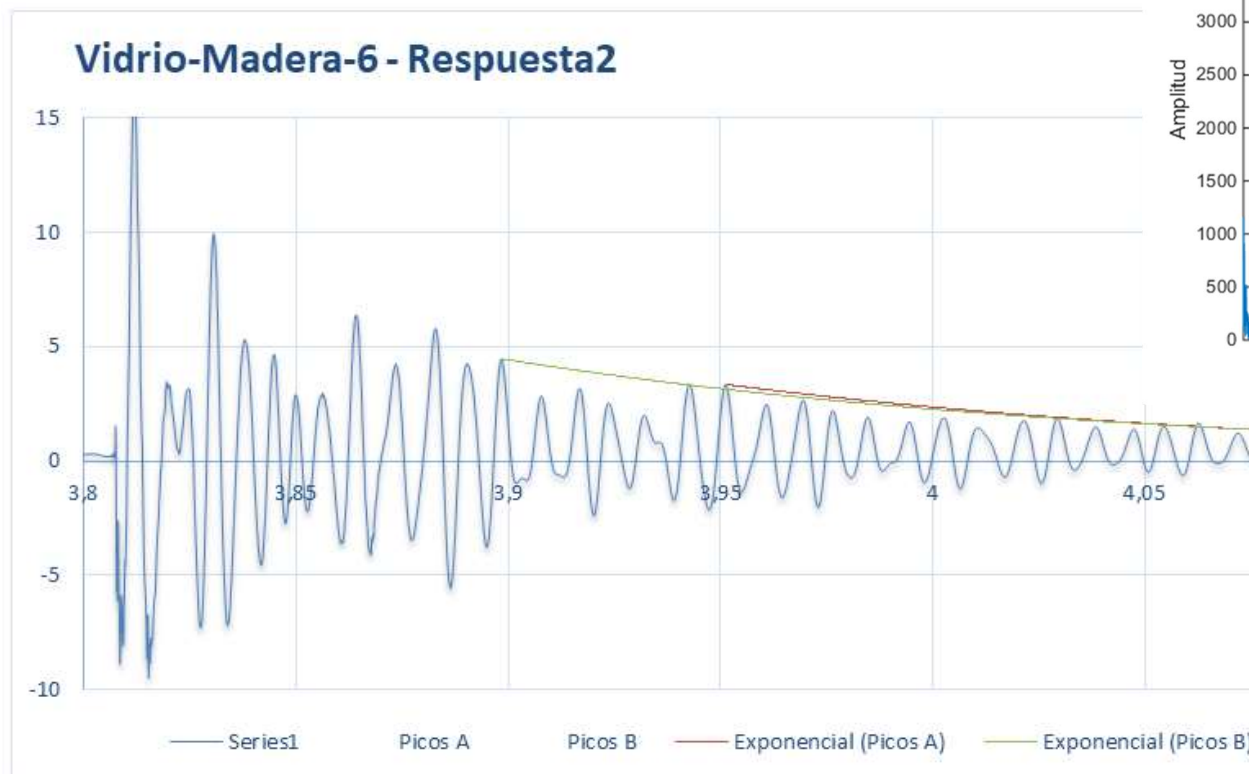
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	9,373125	86,641163
A18	9,514609	5,16401
δ	0,15667009	
ξ	0,02492707	
B1	9,380781	60,806763
B17	9,514609	5,16401
δ	0,14505809	
ξ	0,02308056	
C14	9,403437	37,637347
C	9,514609	5,16401
δ	0,14187739	
ξ	0,02257473	



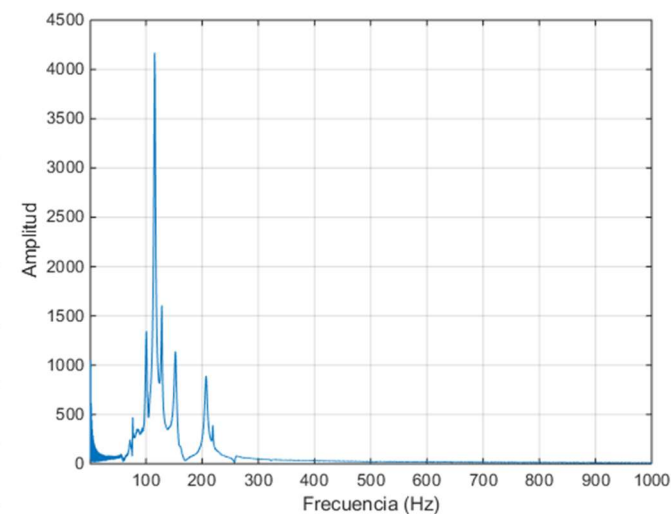
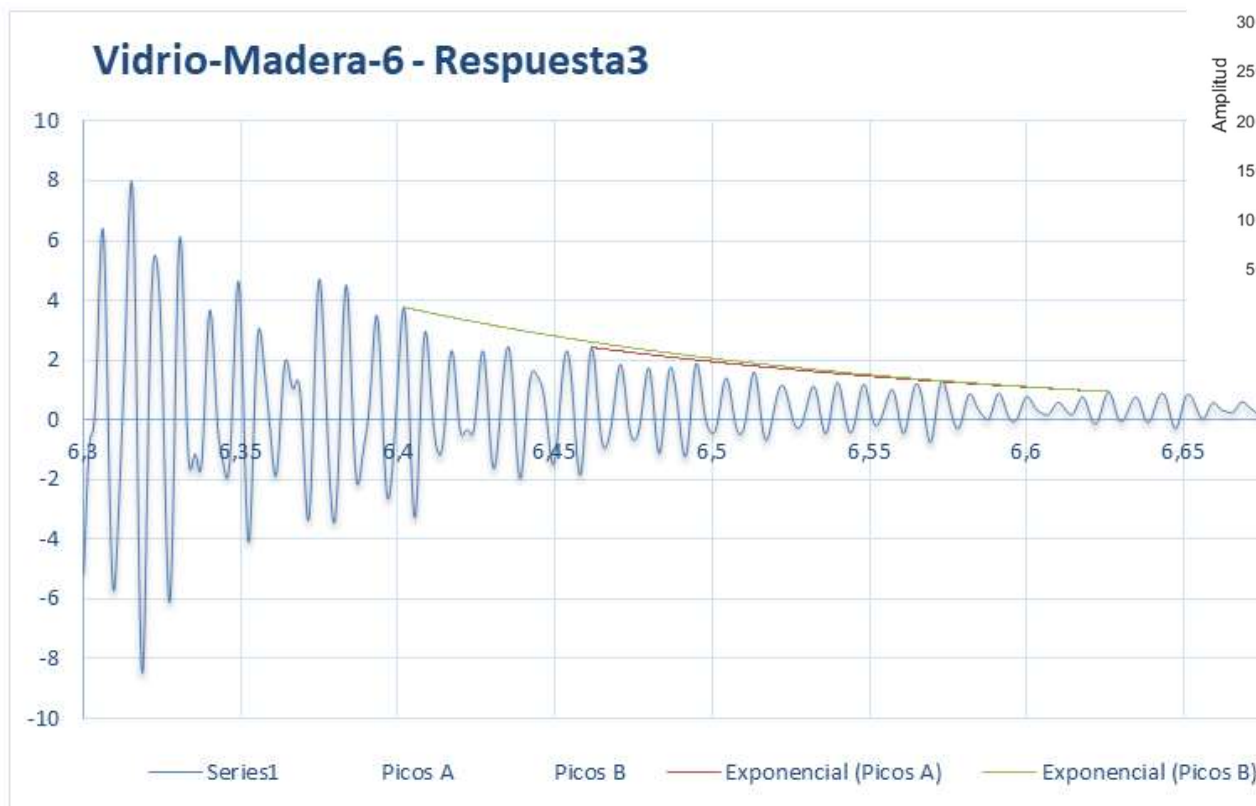
Channels	1
Samples	287500
Date	03/05/2018
Time	17:26:08
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	17:25,8
Delta_X	7,81E-05



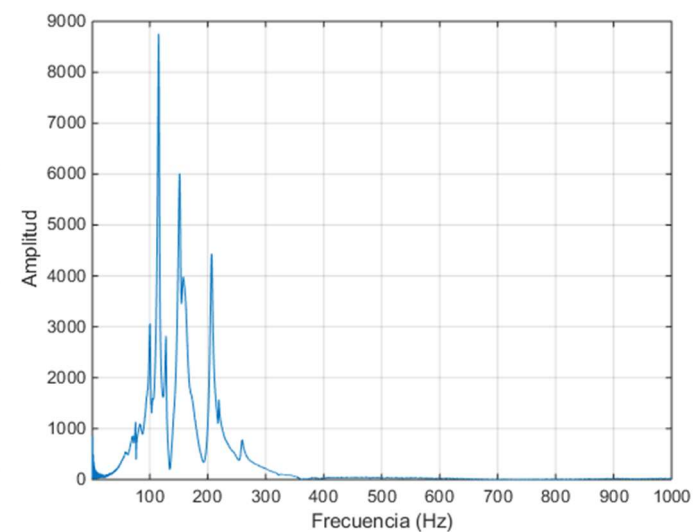
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	1,393984	1,882396
A26	1,620703	0,819175
δ	0,03200011	
ξ	0,00509291	
B1	1,472344	1,253003
B17	1,620703	0,819175
δ	0,02500004	
ξ	0,00397885	



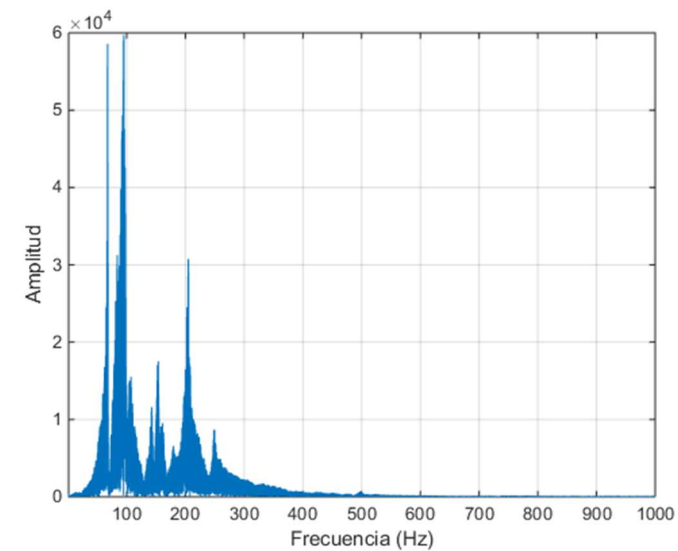
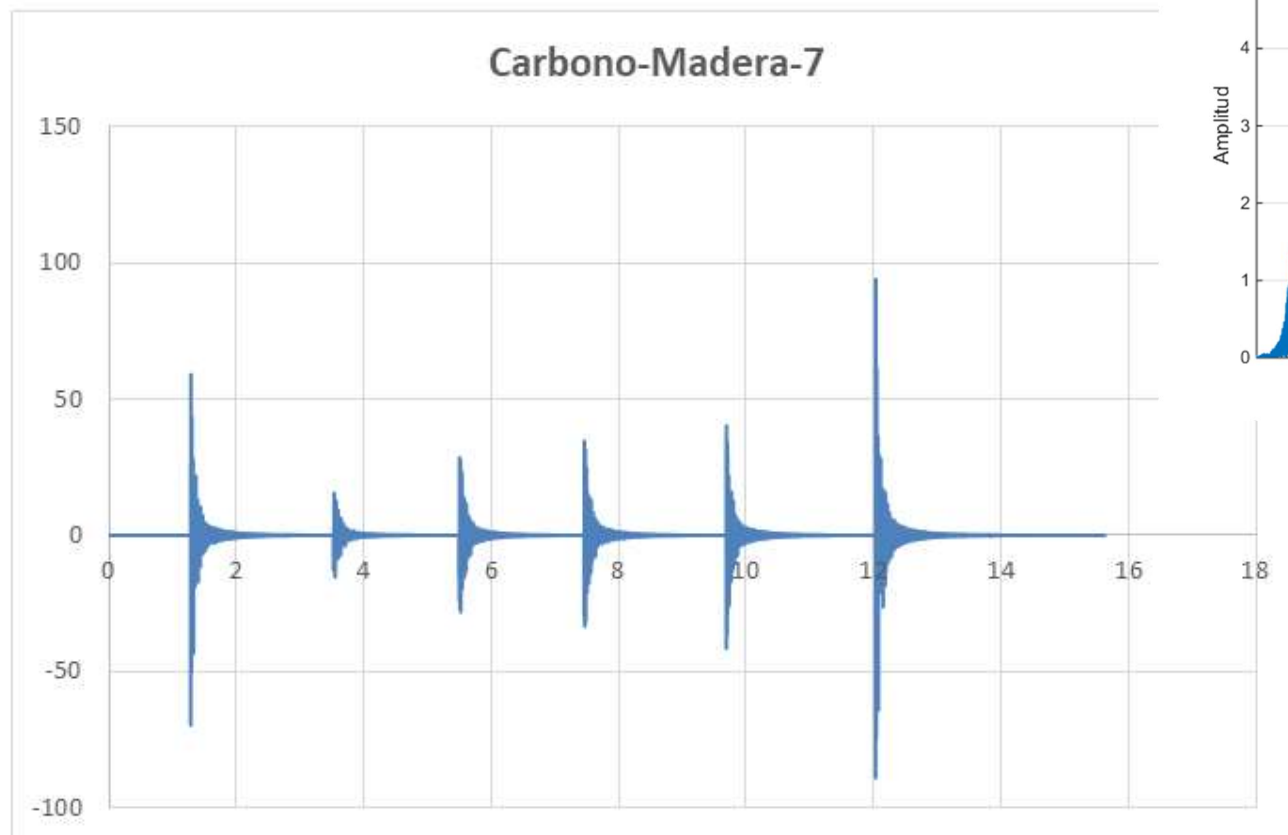
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	3,95125	3,345042
A15	4,080781	1,314788
δ	0,06225359	
ξ	0,00990748	
B1	3,898437	4,468192
B21	4,080781	1,314788
δ	0,05825278	
ξ	0,00927082	



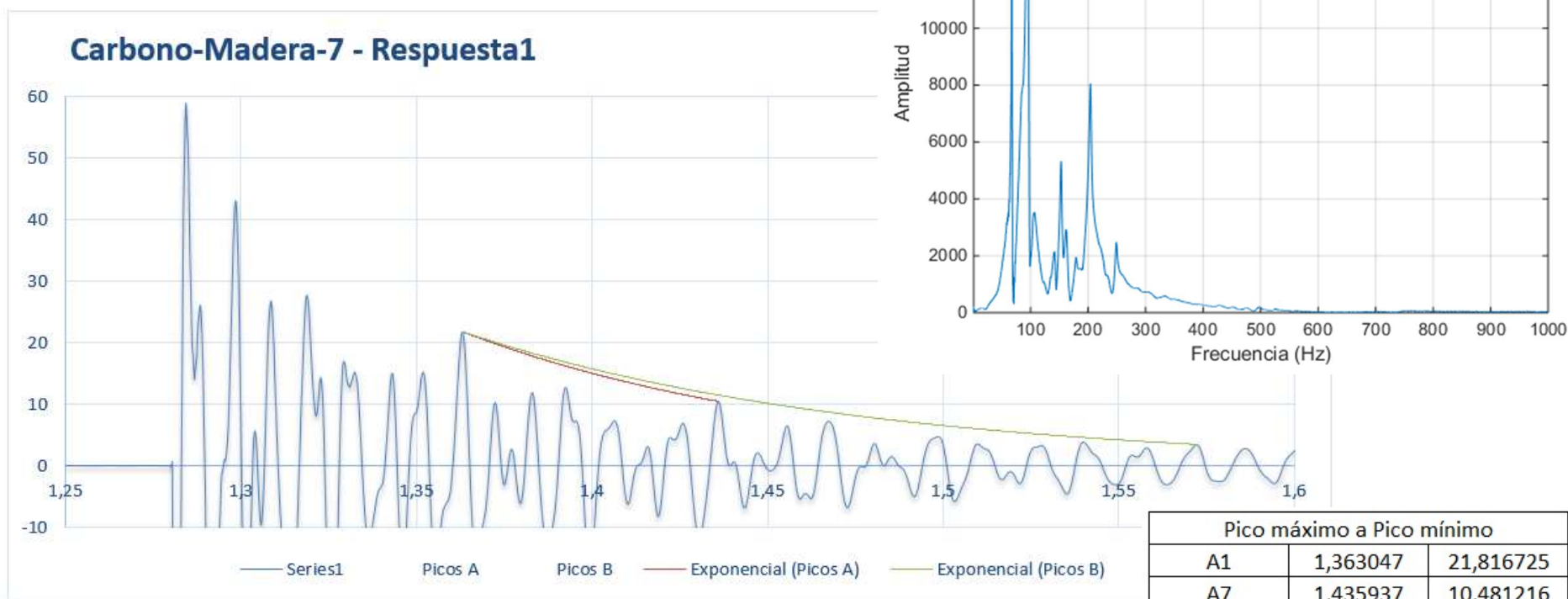
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	6,461719	2,423898
A19	6,626172	0,942339
δ	0,04972459	
ξ	0,00791367	
B1	6,401953	3,76808
B26	6,626172	0,942339
δ	0,05330599	
ξ	0,00848361	



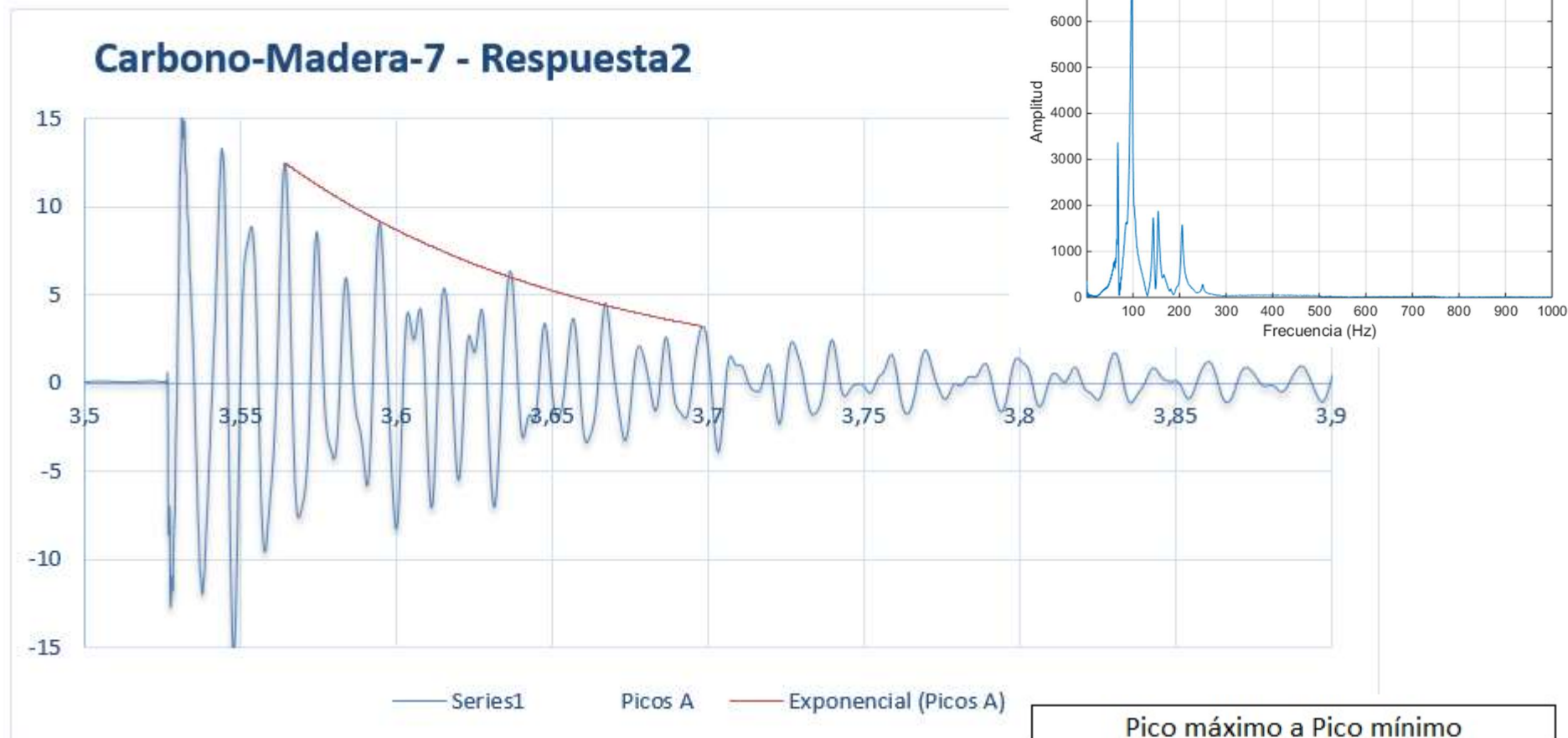
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	8,800781	10,07216
A21	8,983281	2,061601
δ	0,07553773	
ξ	0,01202133	
B1	8,853516	5,761669
B15	8,983281	2,061601
δ	0,06851629	
ξ	0,01090406	



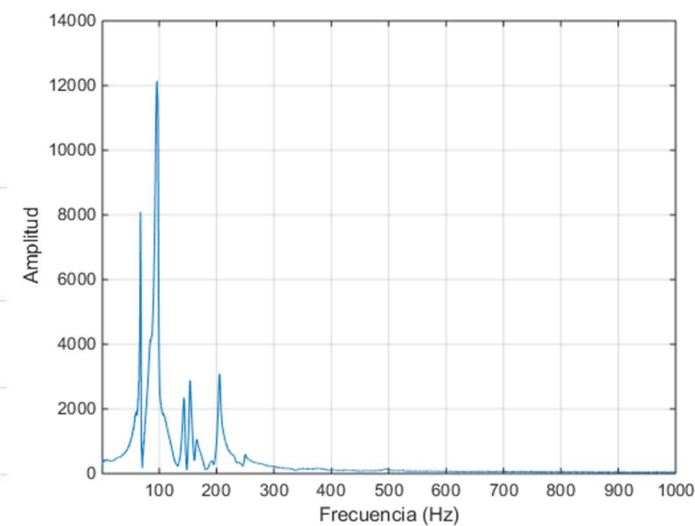
Channels	1
Samples	200000
Date	03/05/2018
Time	17:50:05
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	17:49,1
Delta_X	7,81E-05



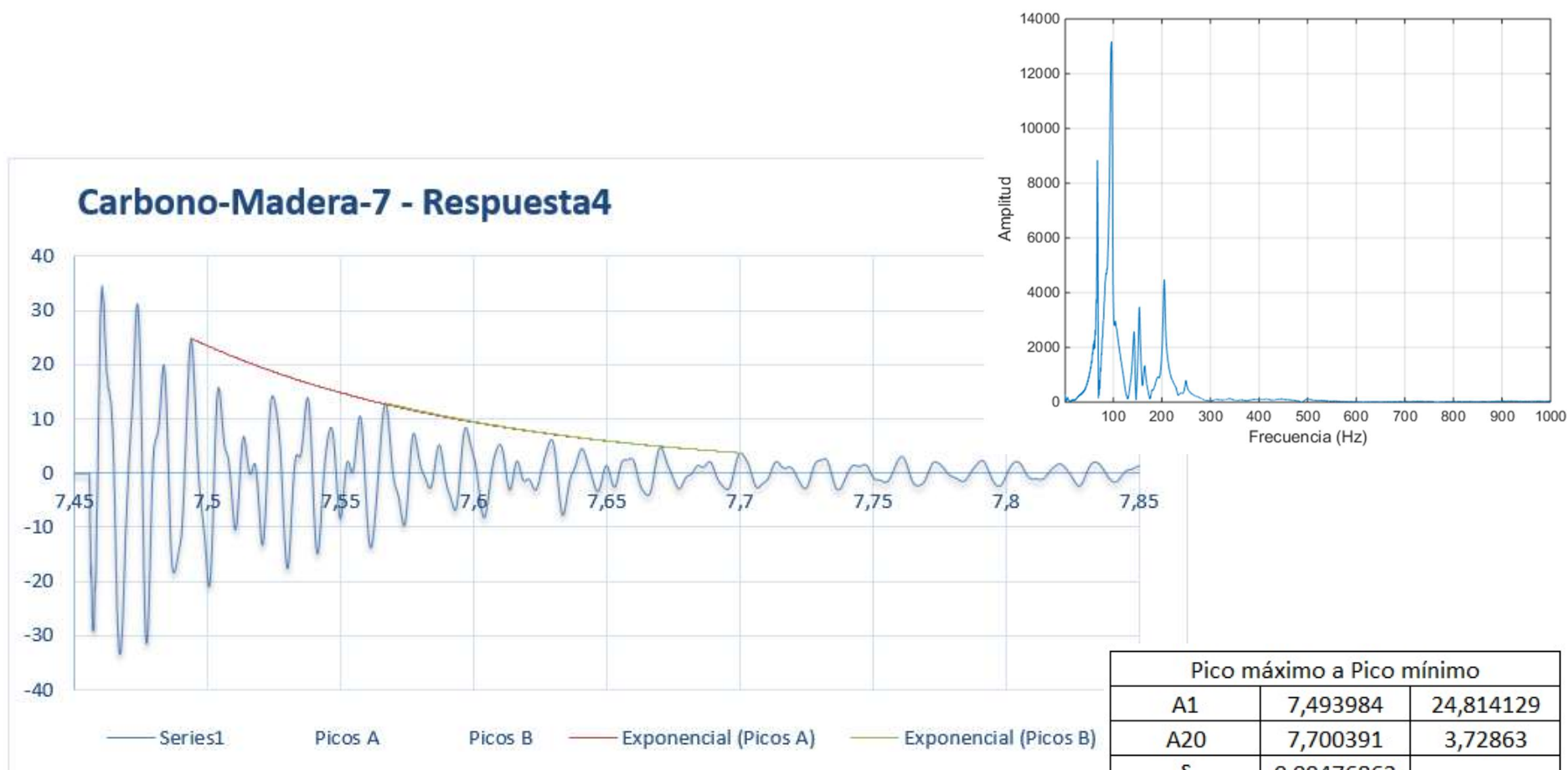
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	1,363047	21,816725
A7	1,435937	10,481216
δ	0,10472745	
ξ	0,01666558	
B1	1,363047	21,816725
B17	1,572109	3,477488
δ	0,10802157	
ξ	0,01718963	

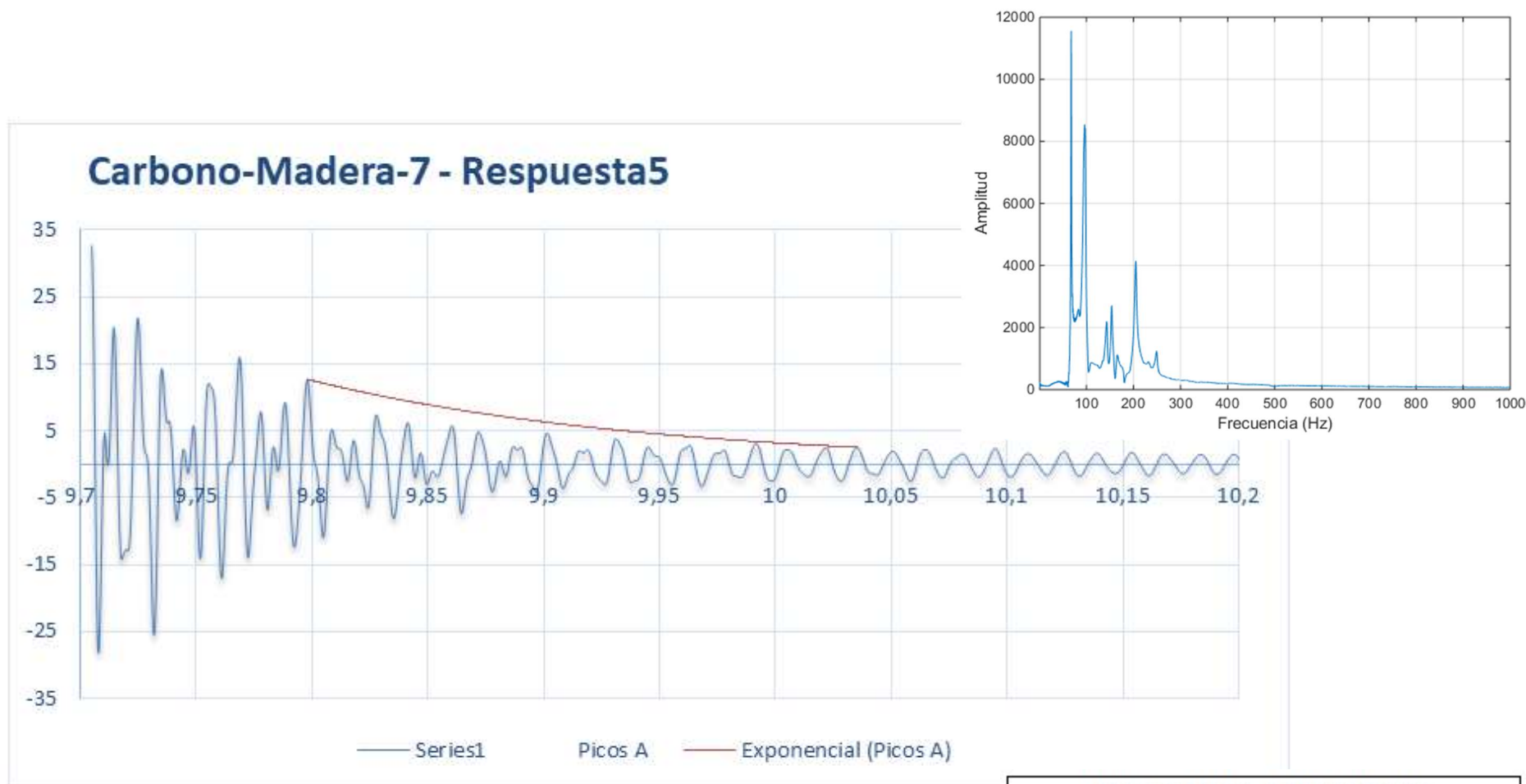


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	3,564219	12,506887
A13	3,698281	3,224838
δ	0,10426129	
ξ	0,01659142	

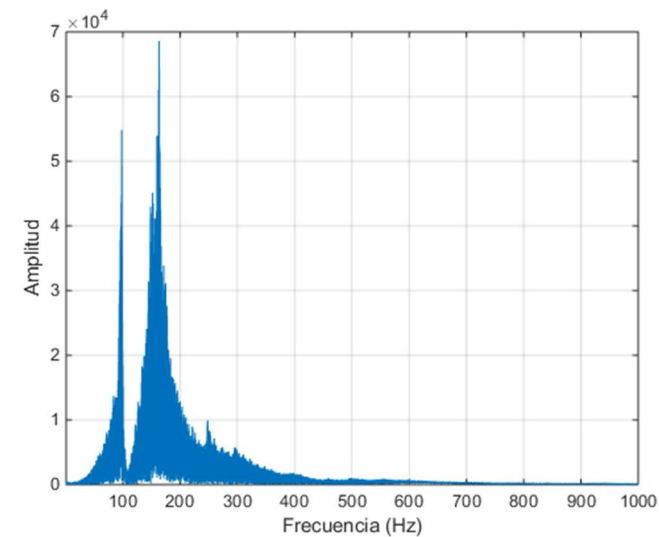
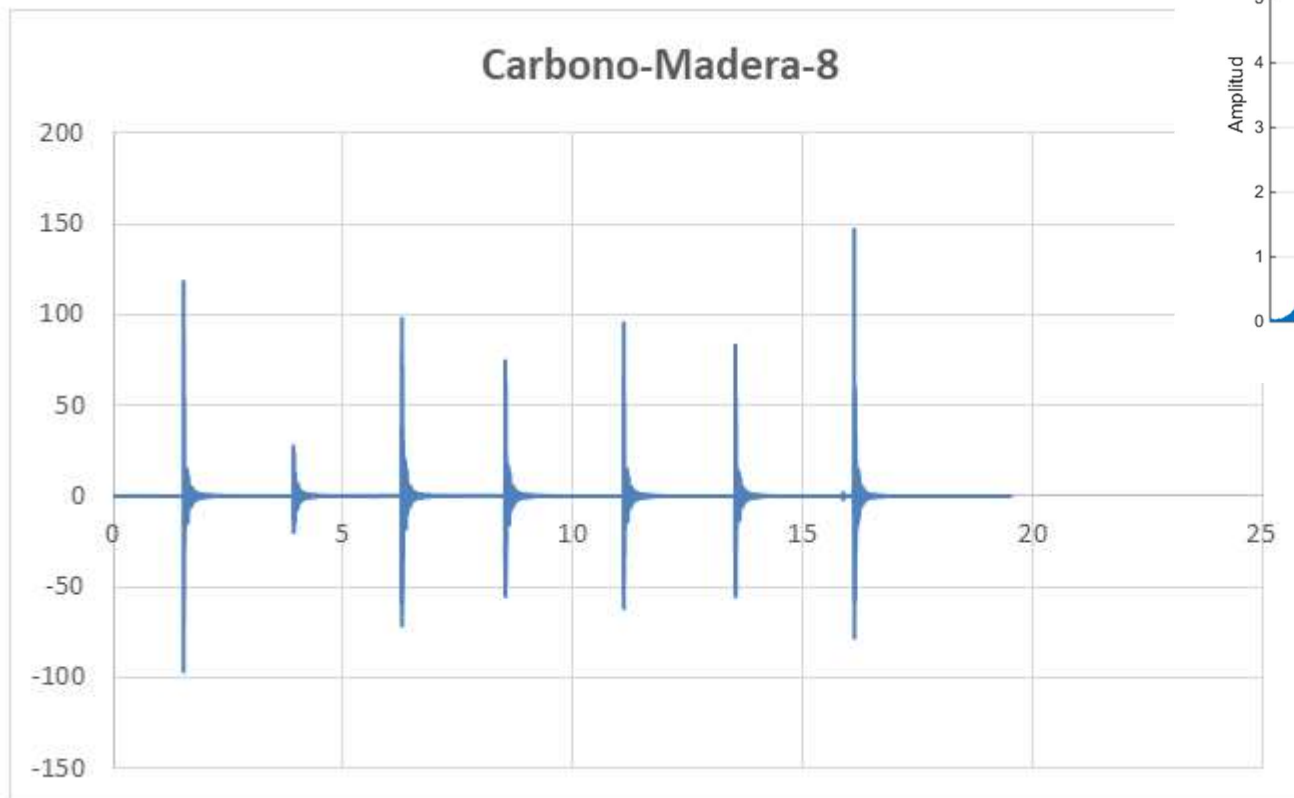


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	5,536406	23,191074
A30	5,846094	1,924862
δ	0,08296377	
ξ	0,01320294	
B1	5,609297	11,439431
B23	5,846094	1,924862
δ	0,07748748	
ξ	0,01233158	

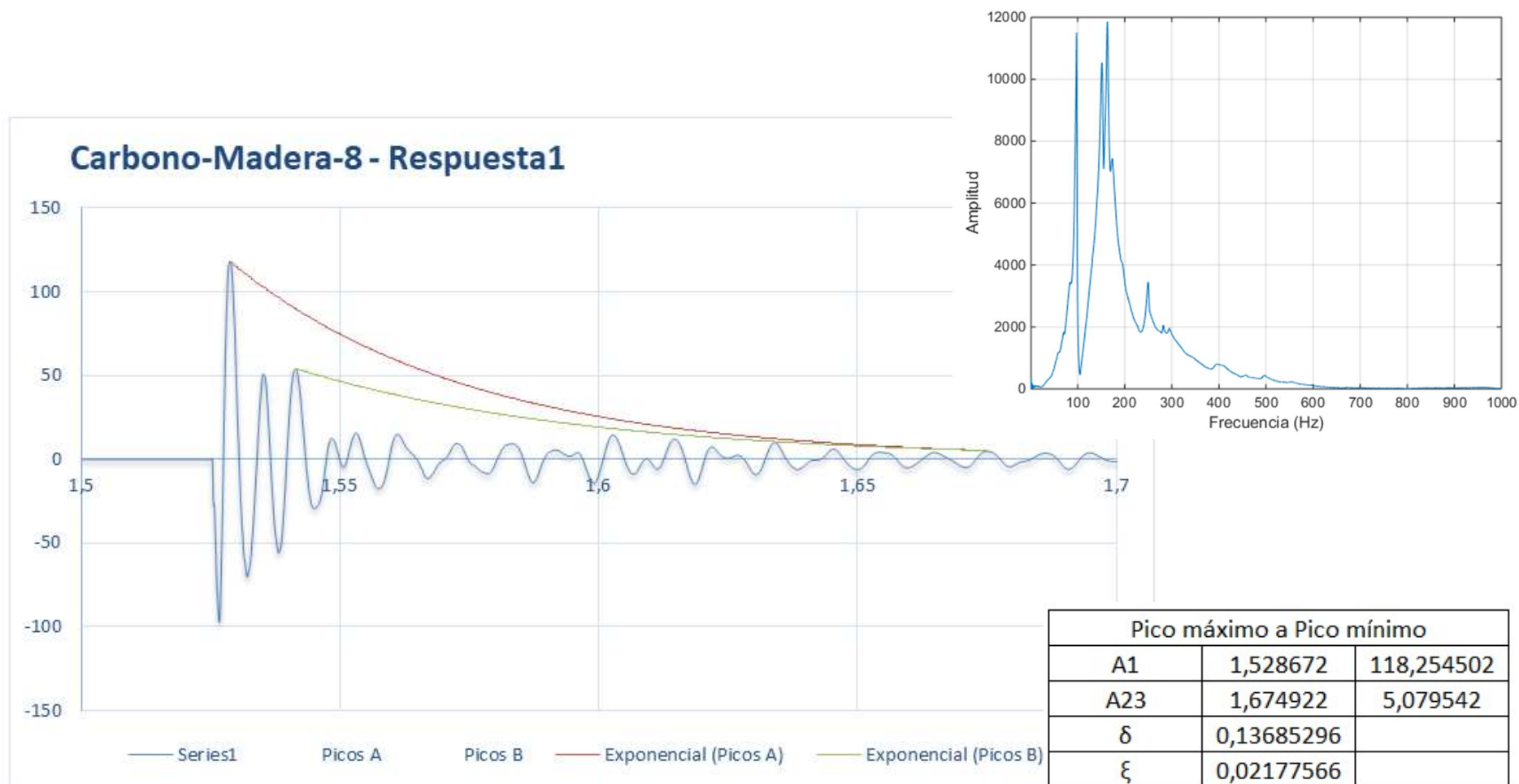




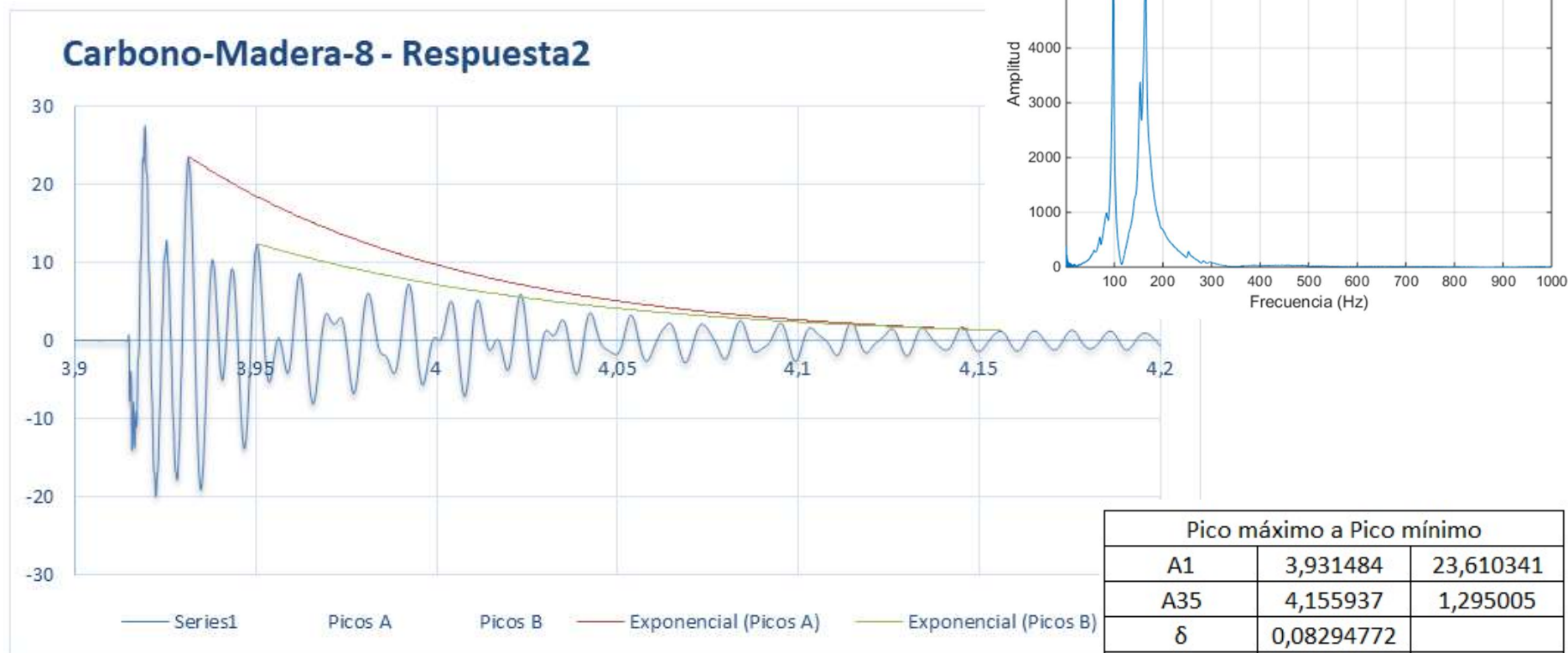
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	9,798125	12,66306
A20	10,035469	2,495371
δ	0,08121258	
ξ	0,0129243	



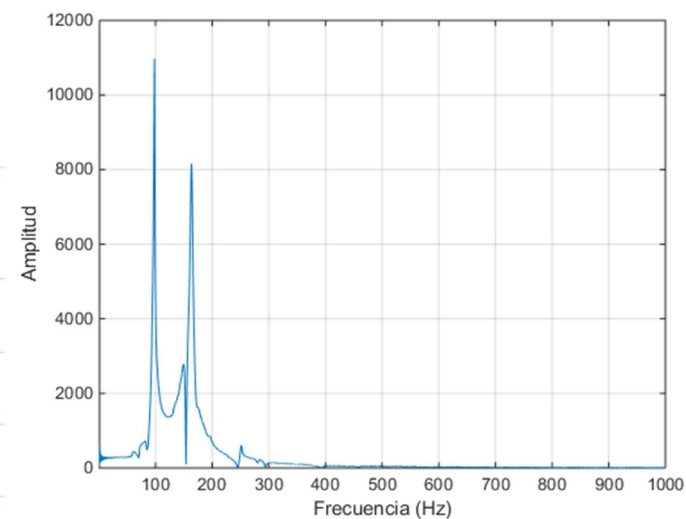
Channels	1
Samples	250000
Date	03/05/2018
Time	17:30:18
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	17:29,5
Delta_X	7,81E-05



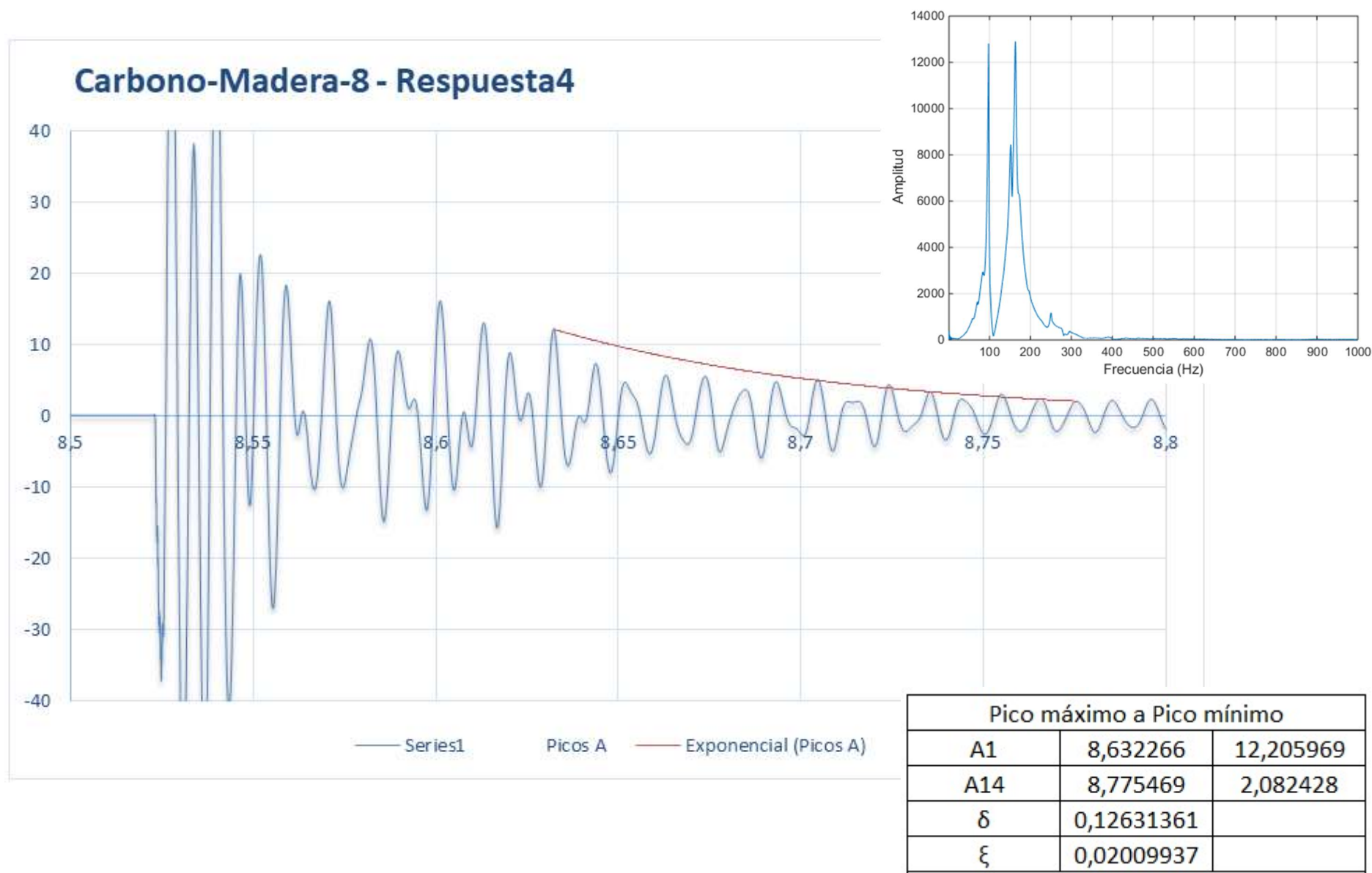
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	1,528672	118,254502
A23	1,674922	5,079542
δ	0,13685296	
ξ	0,02177566	
B1	1,541406	54,16597
B21	1,674922	5,079542
δ	0,11270627	
ξ	0,01793488	

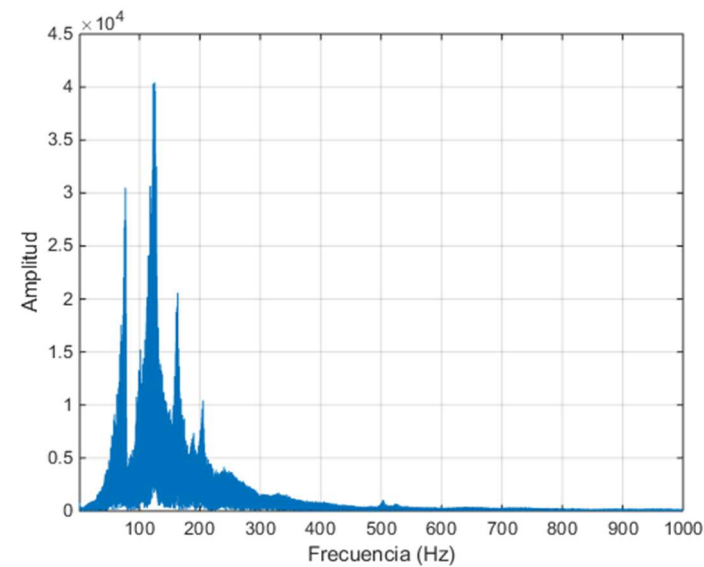
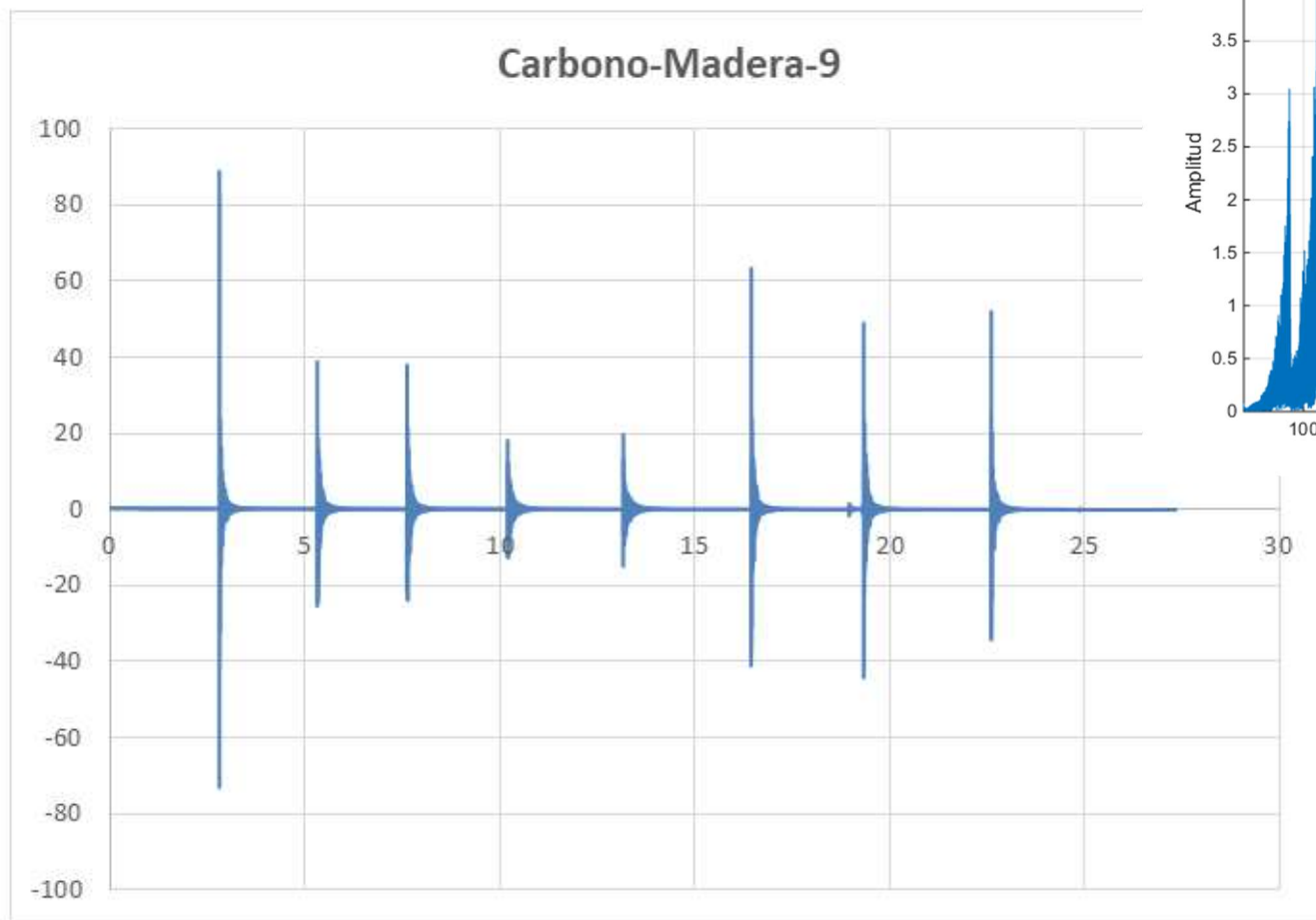


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	3,931484	23,610341
A35	4,155937	1,295005
δ	0,08294772	
ξ	0,01320039	
B1	3,950469	12,421085
B32	4,155937	1,295005
δ	0,07065253	
ξ	0,01124399	



Pico máximo a Pico mínimo		
A1	6,382734	14,485393
A47	6,66875	1,122704
δ	0,05441278	
ξ	0,00865974	
B1	6,474531	4,968329
B32	6,66875	1,122704
δ	0,04647948	
ξ	0,00739724	





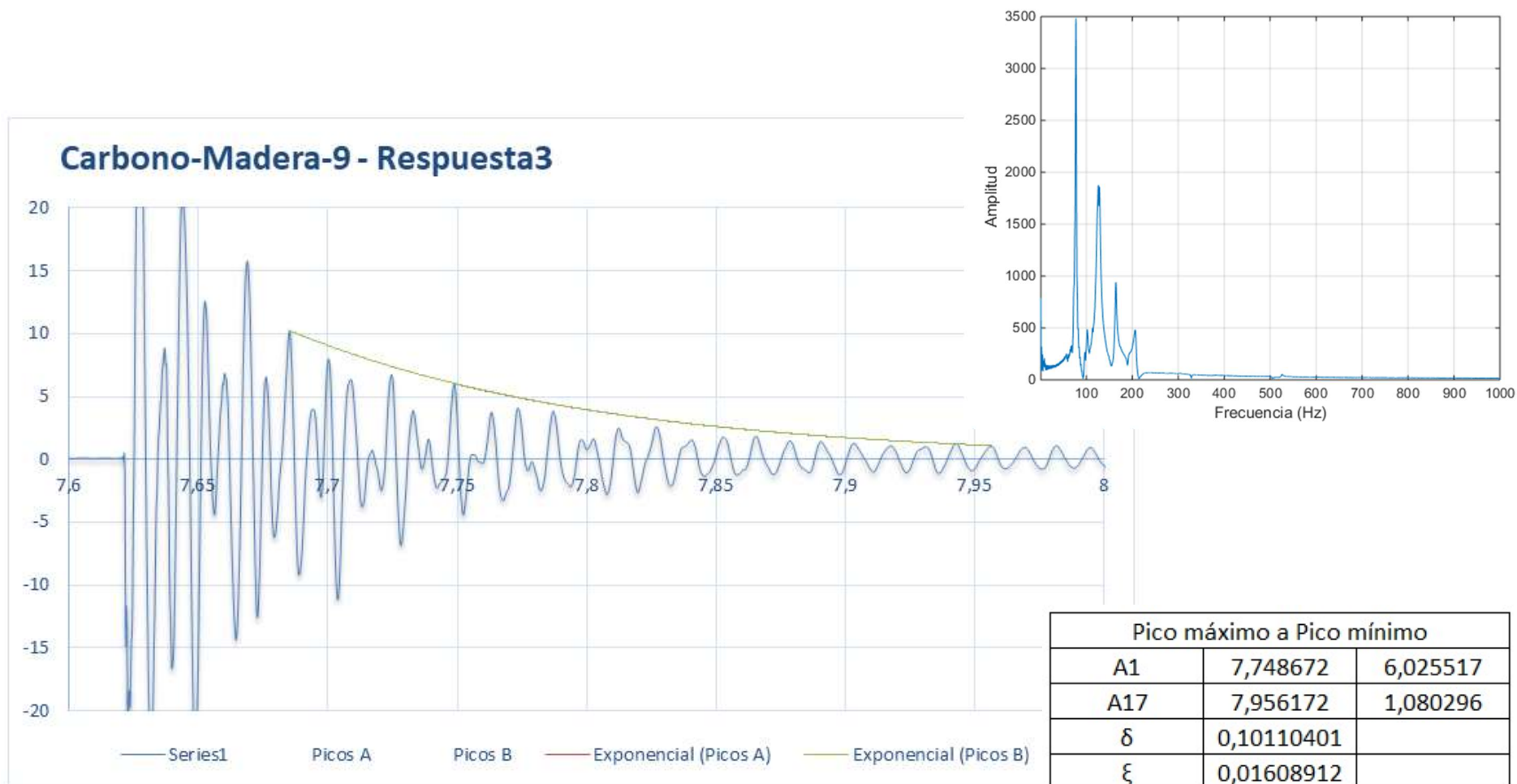
Channels	1
Samples	350000
Date	03/05/2018
Time	17:20:44
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s ²)
X_Dimension	Time (s)
X0	17:19,1
Delta_X	7,81E-05



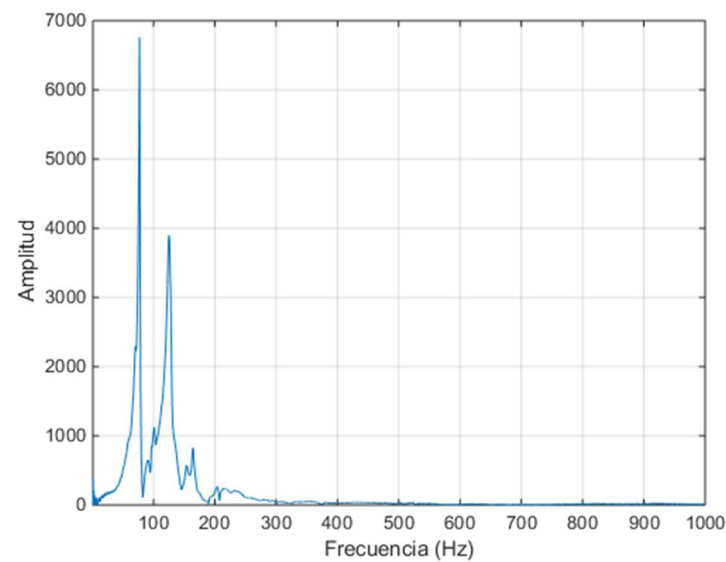
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	2,961719	5,168941
A24	3,260078	0,66451
δ	0,08547388	
ξ	0,01360233	
B1	3,078047	1,702785
B14	3,260078	0,66451
δ	0,06721218	
ξ	0,01069654	



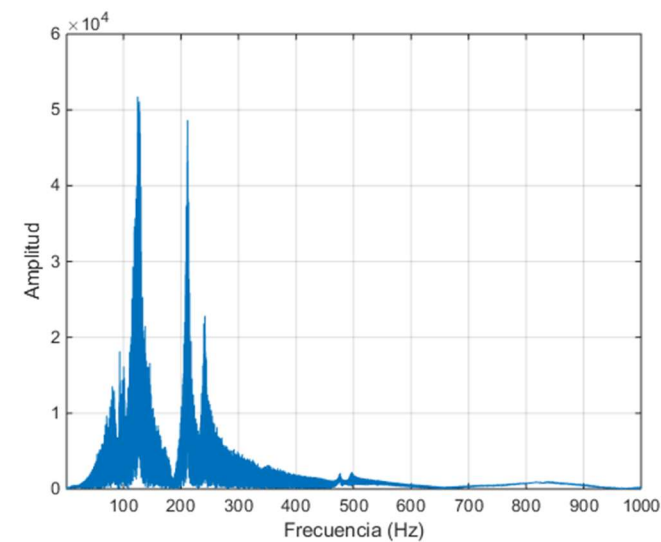
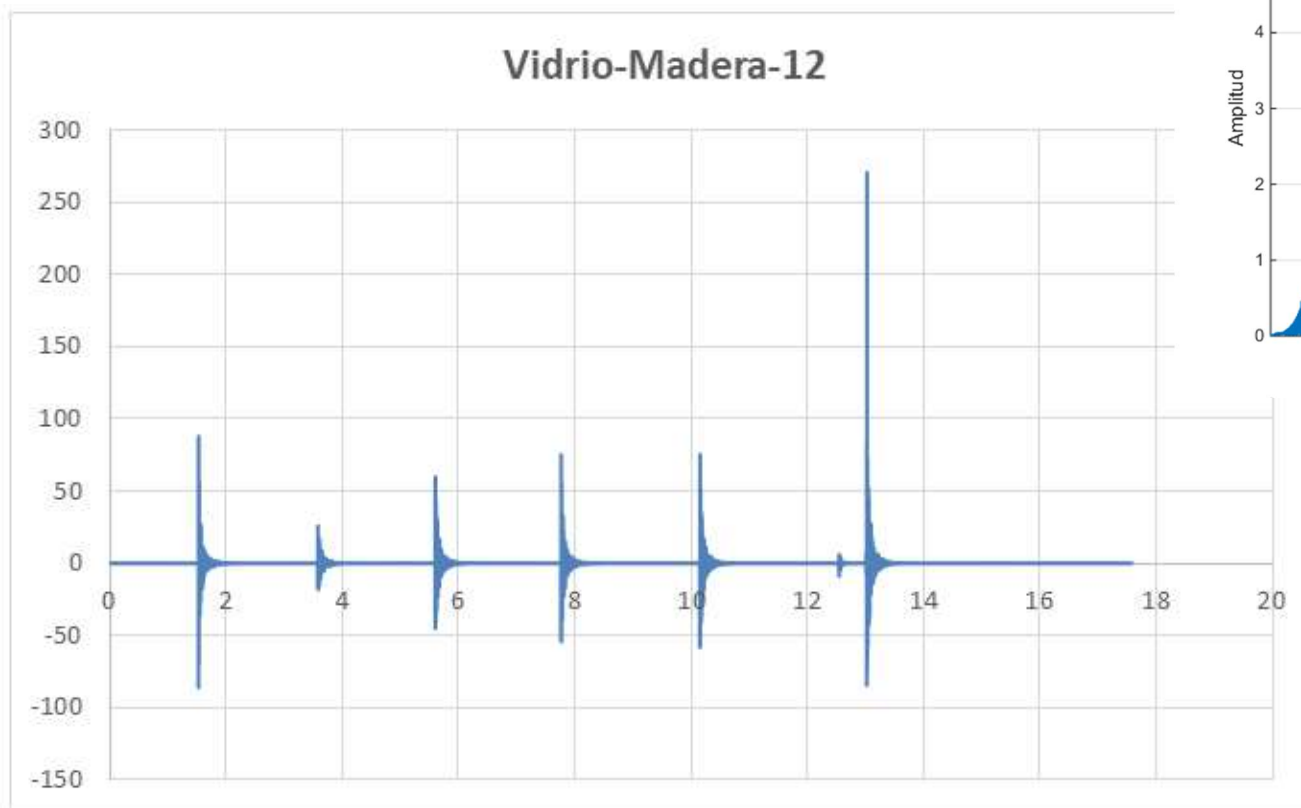
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	5,482266	4,471324
A27	5,83125	0,529164
δ	0,07904228	
ξ	0,01257897	
B1	5,598203	1,618433
B18	5,83125	0,529164
δ	0,0621064	
ξ	0,00988406	



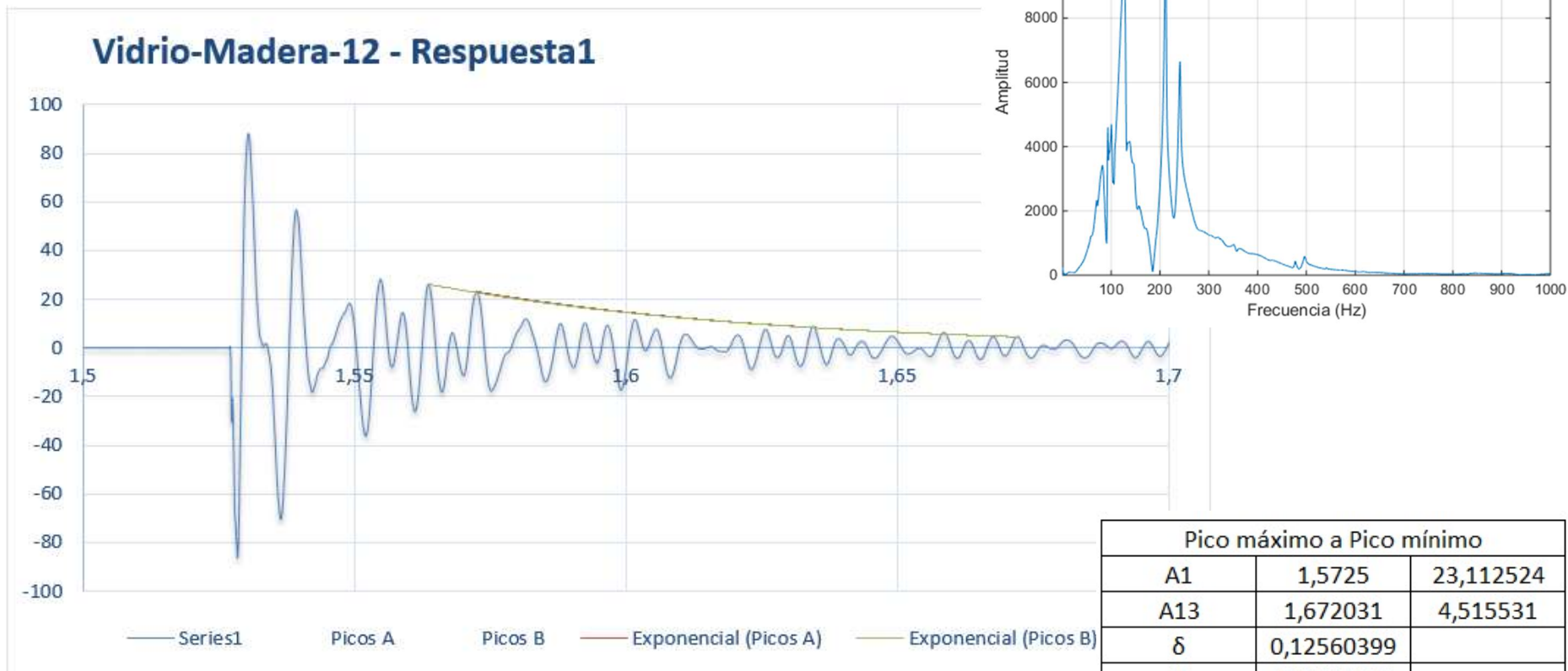
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	7,748672	6,025517
A17	7,956172	1,080296
δ	0,10110401	
ξ	0,01608912	
B1	7,685078	10,251945
B23	7,956172	1,080296
δ	0,09783619	
ξ	0,01556923	



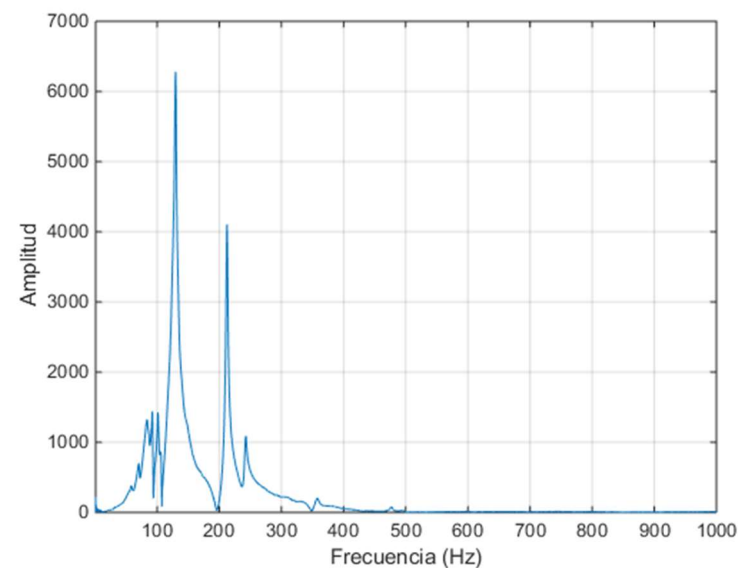
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	10,260859	7,958424
A15	10,557734	1,104256
δ	0,13167061	
ξ	0,02095143	
B1	10,36375	3,308494
B23	10,557734	1,104256
δ	0,04770962	
ξ	0,007593	



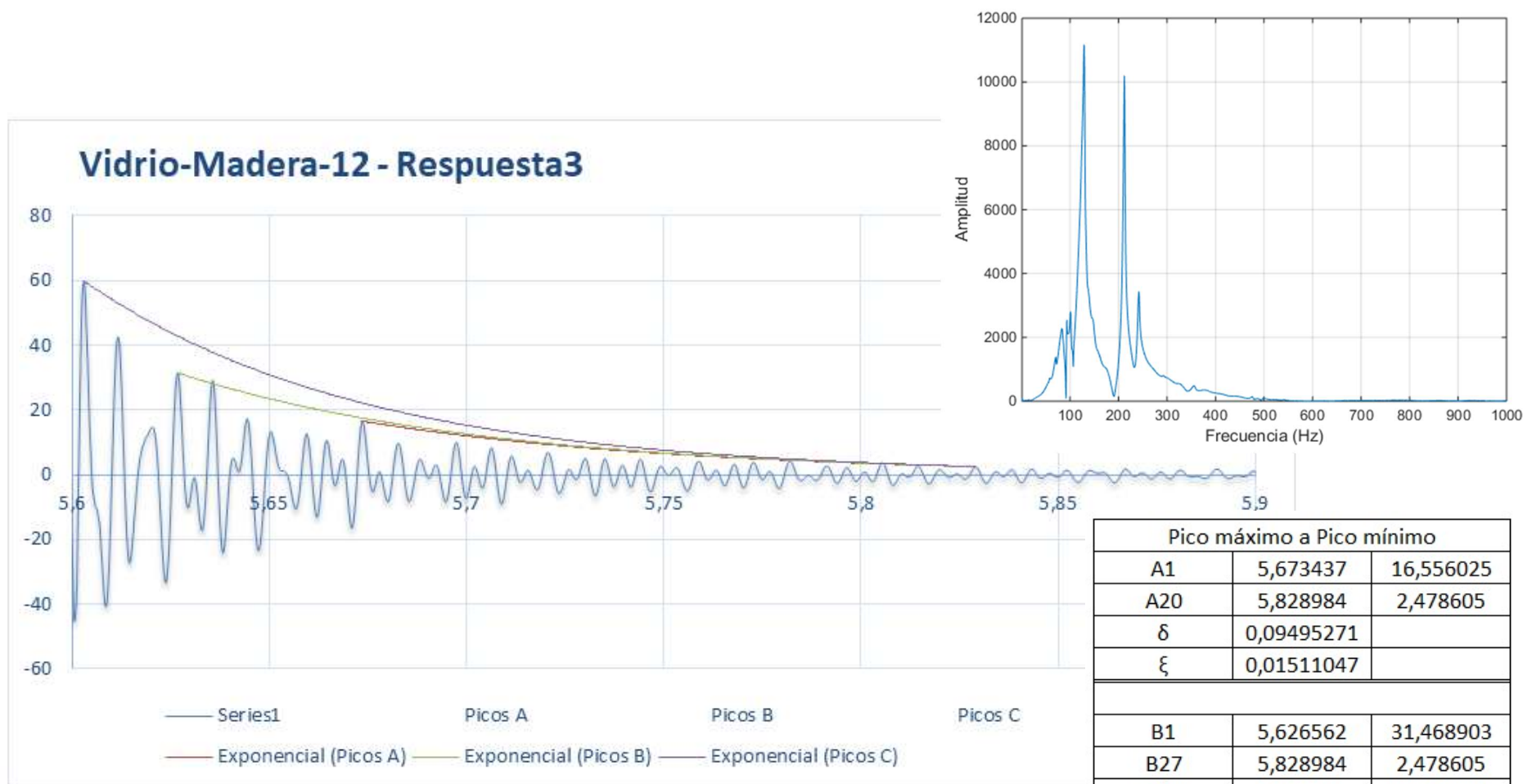
Channels	1
Samples	225000
Date	03/05/2018
Time	17:34:22
Y_Unit_Label	Acceleration (m/s^2)
X_Dimension	Time (s)
X0	17:34,0
Delta_X	7,81E-05



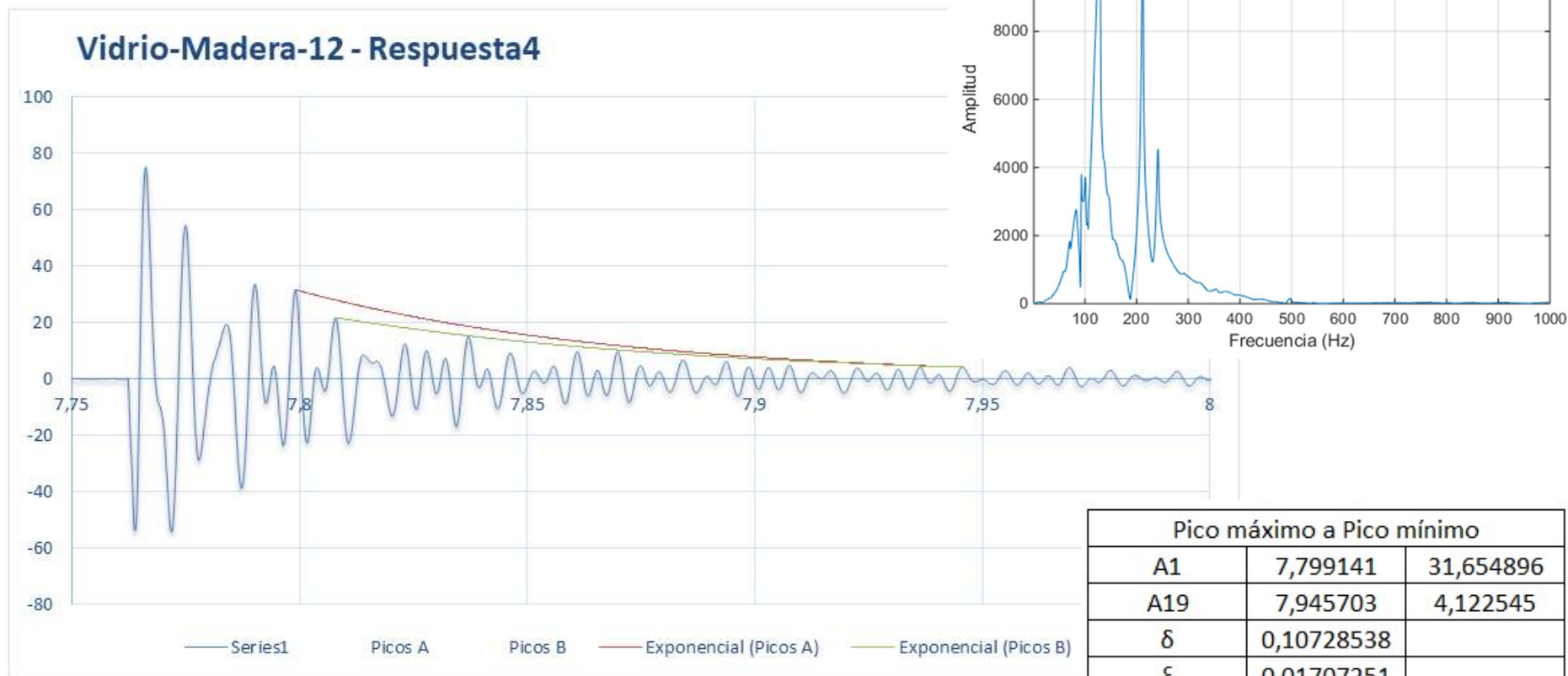
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	1,5725	23,112524
A13	1,672031	4,515531
δ	0,12560399	
ξ	0,0199865	
B1	1,563594	26,214353
B14	1,672031	4,515531
δ	0,12562745	
ξ	0,01999023	



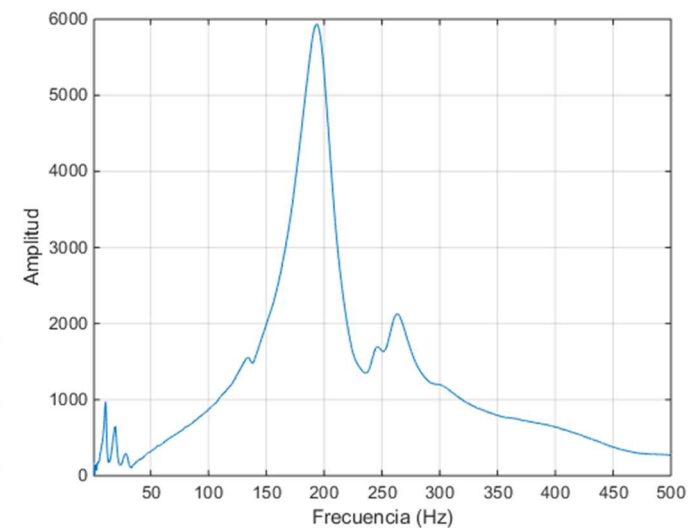
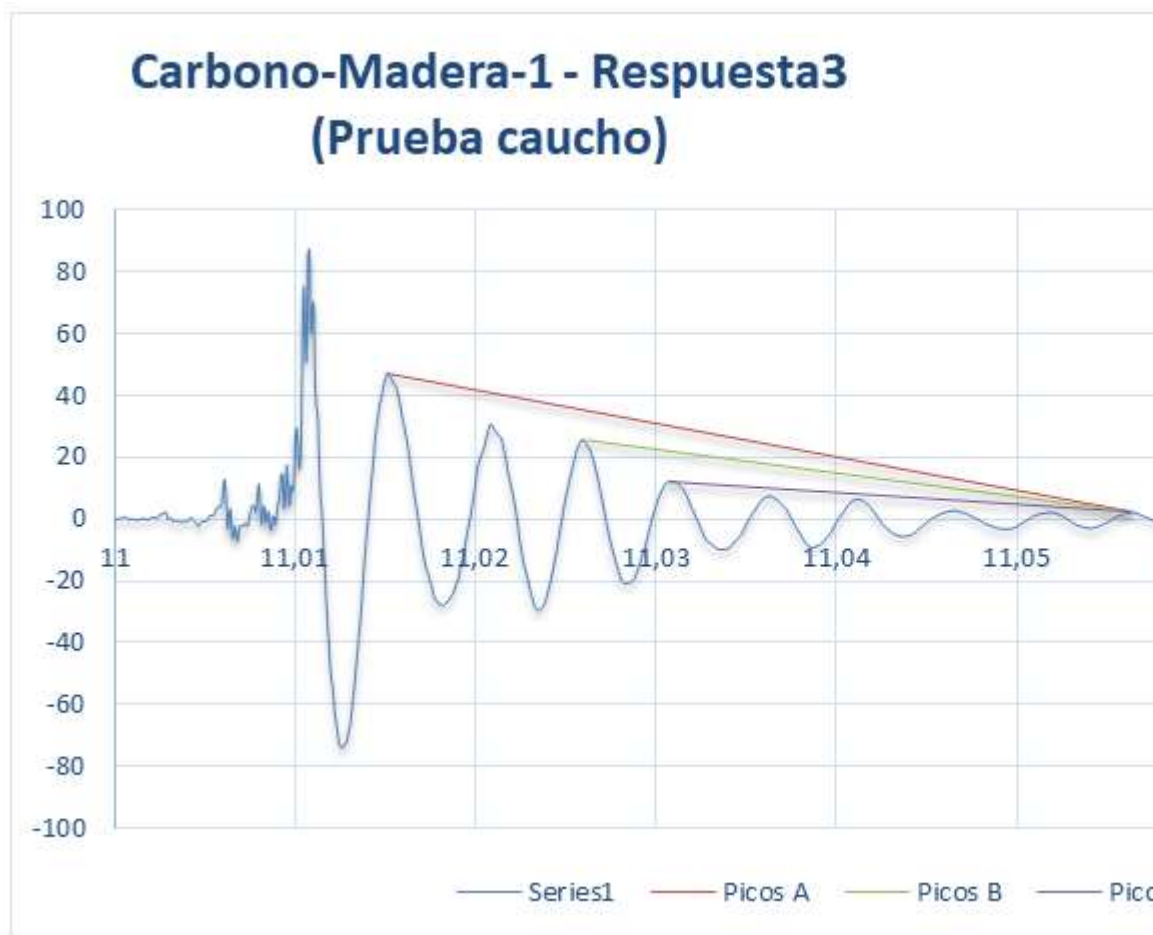
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	3,653437	8,307841
A14	3,761641	1,861279
δ	0,10685256	
ξ	0,01700365	
B1	3,615547	13,48007
B19	3,761641	1,861279
δ	0,10420781	
ξ	0,01658291	



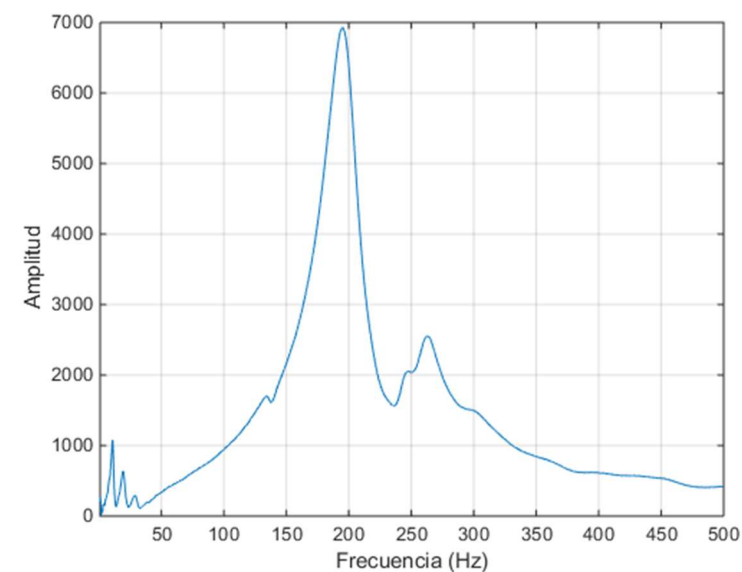
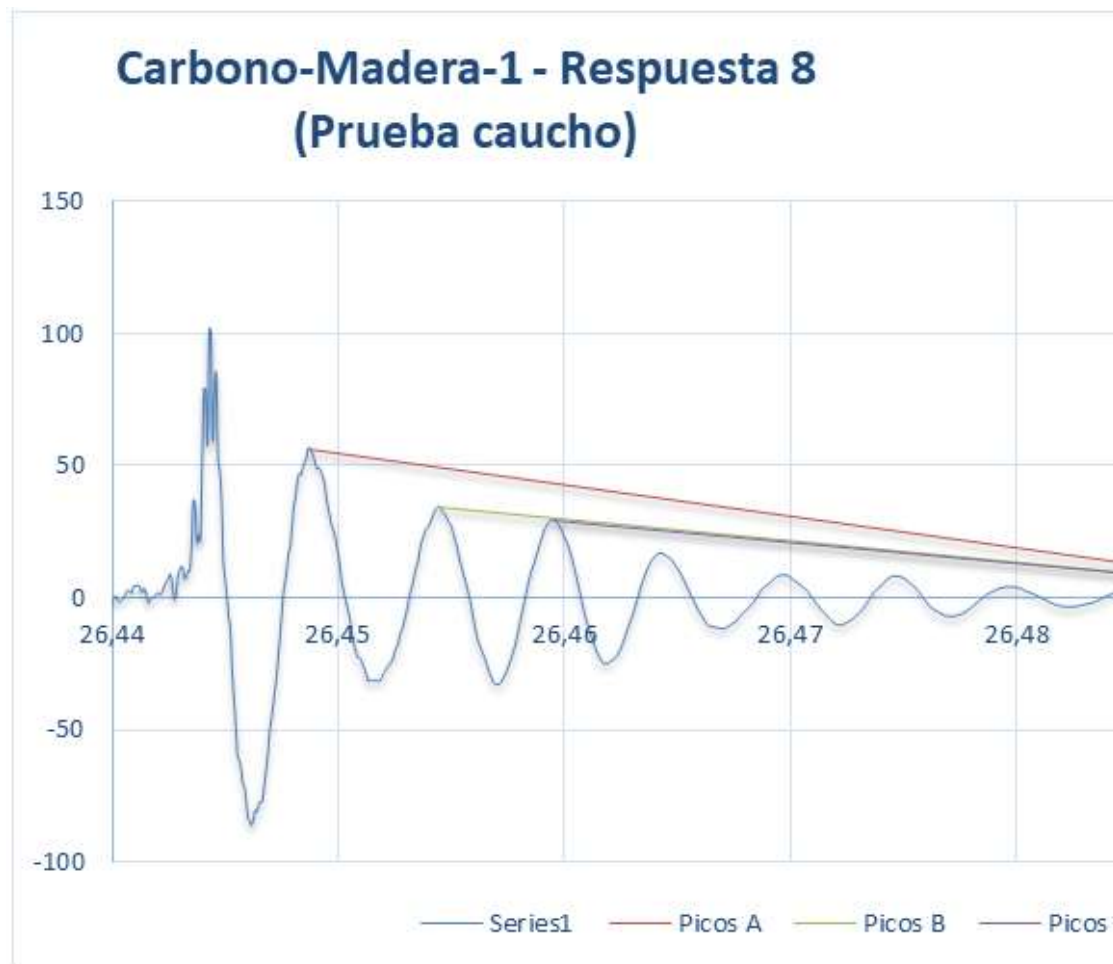
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	5,673437	16,556025
A20	5,828984	2,478605
δ	0,09495271	
ξ	0,01511047	
B1	5,626562	31,468903
B27	5,828984	2,478605
δ	0,09412237	
ξ	0,01497836	
C1	5,602812	59,912537
C30	5,828984	2,478605
δ	0,106173	
ξ	0,01689555	





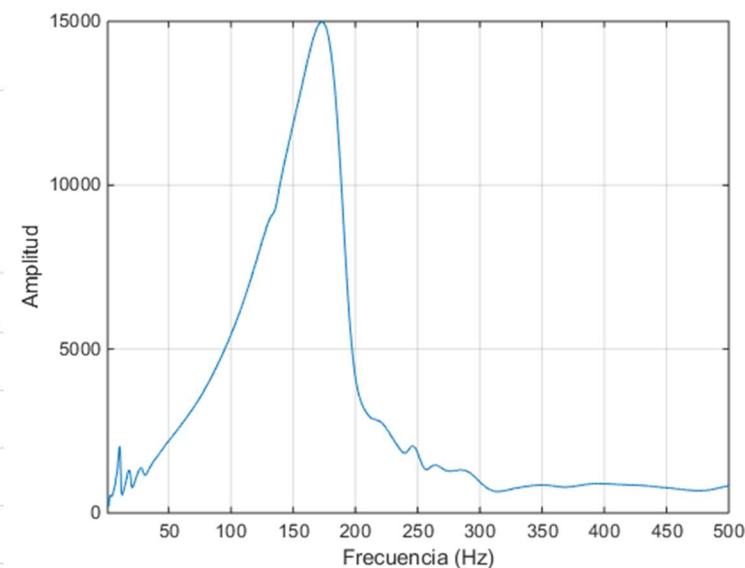
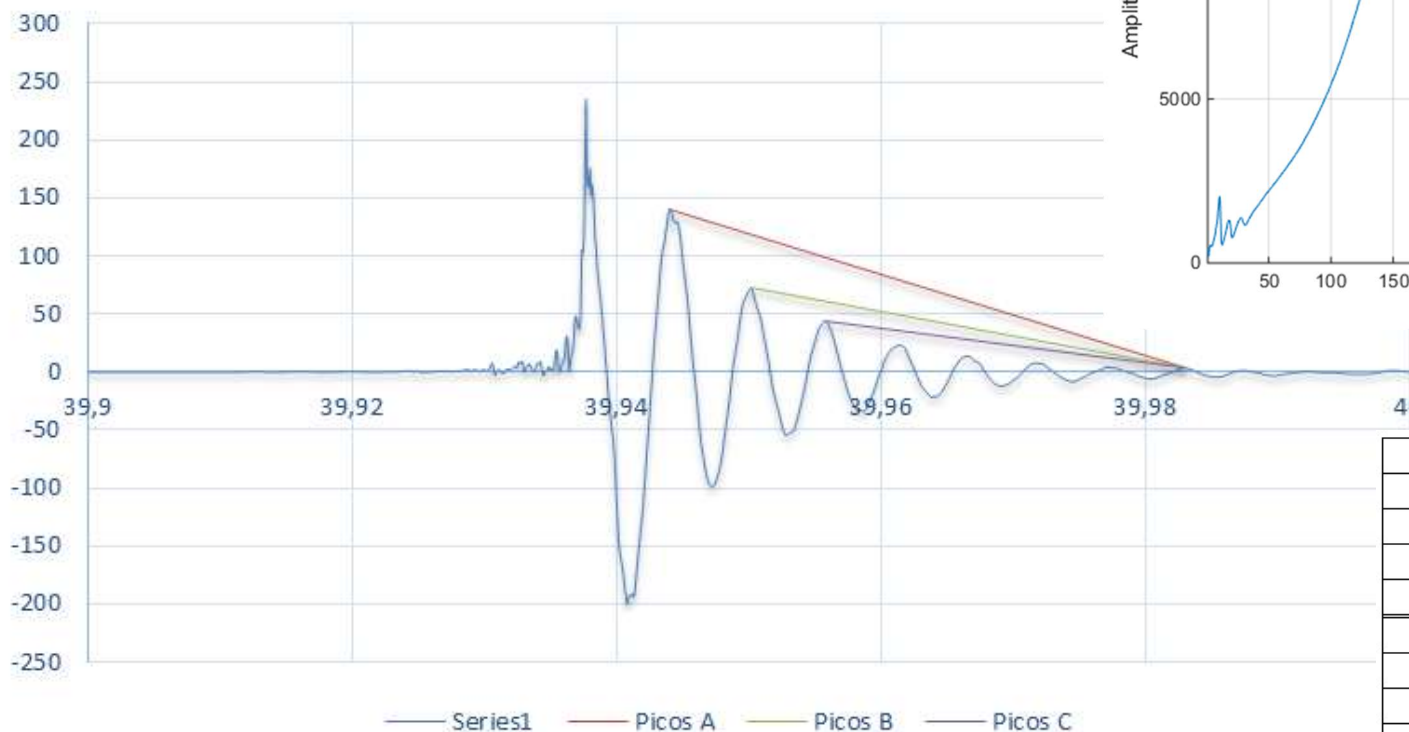


Pico máximo a Pico mínimo		
A1	11,015156	47,088739
A8	11,056406	2,157208
δ	0,38540239	
ξ	0,06122363	
B1	11,025859	25,44358
B6	11,056406	2,157208
δ	0,41127478	
ξ	0,06531664	
C1	11,030781	12,14198
C5	11,056406	2,157208
δ	0,34557082	
ξ	0,05491631	



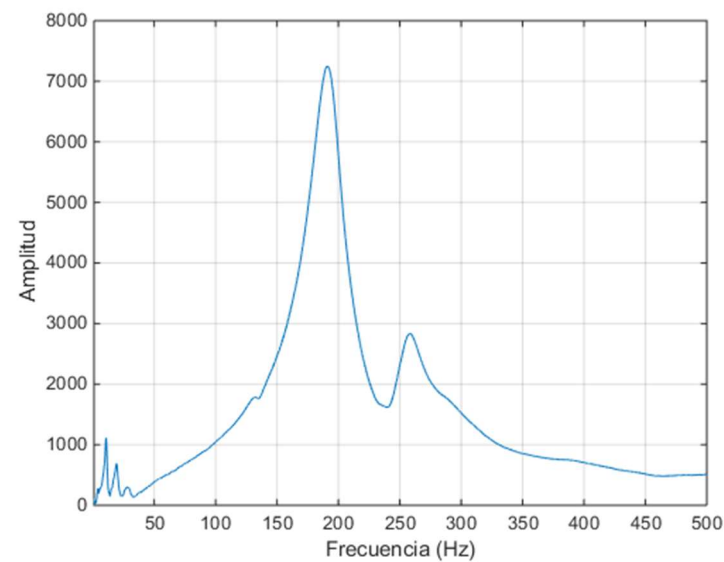
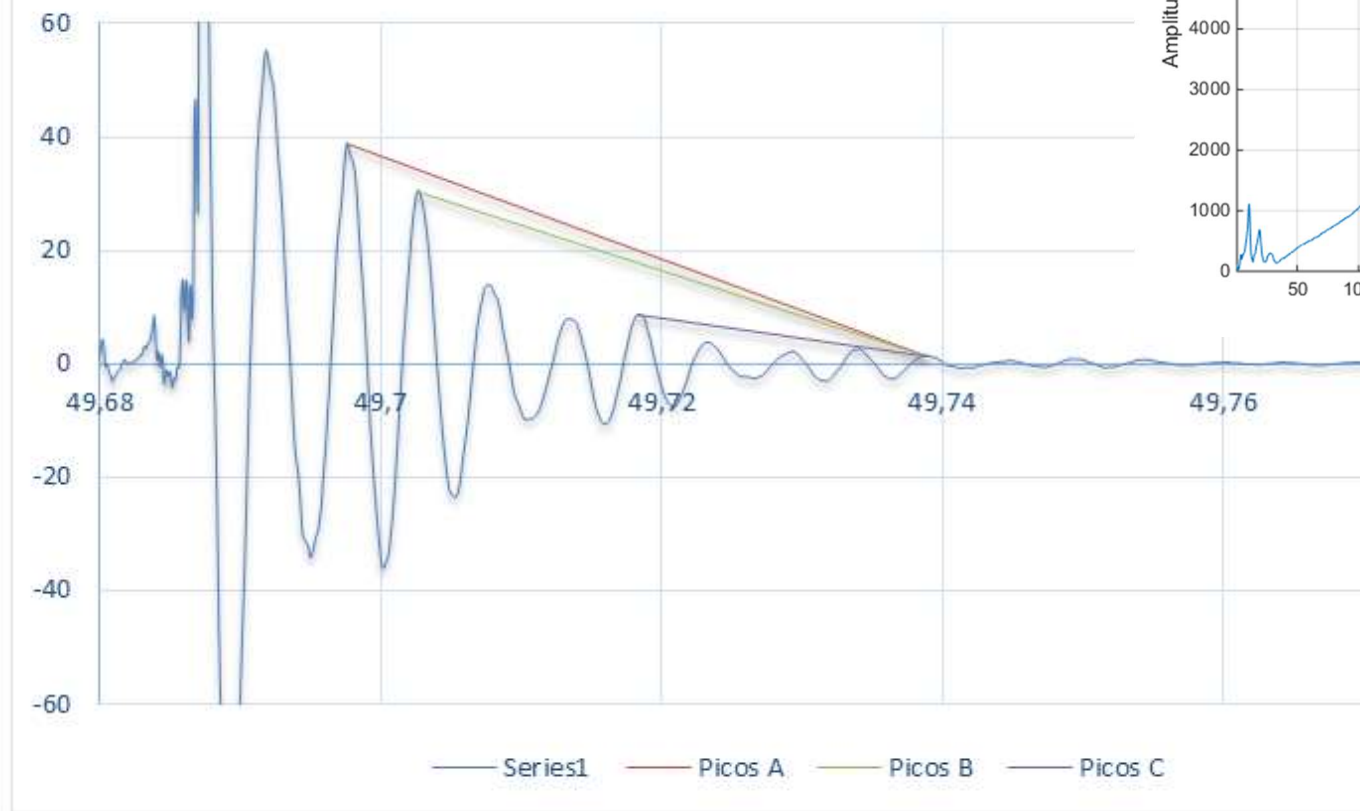
Pico máximo a Pico mínimo		
A1	26,44875	56,313587
A	26,494609	1,245113
δ	0,47646369	
ξ	0,07561446	
B1	26,454453	34,40139
B	26,494609	1,245113
δ	0,55314511	
ξ	0,0876966	
C1	26,459531	29,262635
C	26,494609	1,245113
δ	0,63141703	
ξ	0,09998952	

Carbono-Madera-1 - Respuesta12 (Prueba caucho)



Pico máximo a Pico mínimo		
A1	39,944062	140,062622
A7	39,982969	3,580927
δ	0,52378113	
ξ	0,0830742	
B1	39,950156	72,555389
B6	39,982969	3,580927
δ	0,50145476	
ξ	0,07955604	
C1	39,955781	44,63185
C5	39,982969	3,580927
δ	0,5045652	
ξ	0,08004636	

Carbono-Madera-1 - Respuesta 15 (Prueba caucho)



Pico máximo a Pico mínimo		
A1	49,697578	38,828488
A8	49,738828	1,354296
δ	0,41948406	
ξ	0,06661467	
B1	49,702656	30,547294
B7	49,738828	1,354296
δ	0,44514205	
ξ	0,07066943	
C1	49,718281	8,625177
C4	49,738828	1,354296
δ	0,46285093	
ξ	0,07346595	