

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



“Estudio numérico de las propiedades de amortiguación de vibraciones en espumas metálicas en base a la aleación con memoria de forma CuAlBe, para dispositivos livianos de disipación de energía”

JUAN PABLO APABLAZA ZAMORA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: DR. ING. LUIS PÉREZ P.

PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. DANILO ESTAY B.

Agradecimientos

Quiero agradecer por medio de estas líneas primeramente a mis Padres, Fernando y Patricia, me entregaron el apoyo ,cariño y valores que cualquier hijo desearía tener, apreciando también la libertad que me dieron para pensar y decidir por mí mismo sobre mis convicciones y mis gustos, sin lugar a duda un precioso regalo que valoro tener cada día.

Agradezco a mis hermanos, Fernando, Felipe y Matias, personas con grandes valores y entrega, ejemplos que llevo por delante en mi vida y puntos de referencia en las decisiones que he tomado y tomaré.

Quiero reconocer el apoyo de los profesores guías de este trabajo, por sus correcciones y soporte académico en la idea de la tesis. Agradecer al jefe del laboratorio de mecánica computacional por la buena disponibilidad que tuvo en el transcurso de este trabajo.

Por ultimo agradezco a mis amigos y compañeros de Universidad, un gran apoyo en el tiempo de mi carrera, tanto en las aulas como también fuera de ellas.

Para finalizar quiero agradecer a la Vida la oportunidad que me dio de conocer y la claridad para entender ideas que en varios casos escapan de lo real cotidiano, pero que al entregarles el esfuerzo necesario para descifrarlas, embellecen por medio de su ciencia hasta el más pequeño detalle de la realidad misma.

Muchas gracias.

JAZ

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología capaz de caracterizar numéricamente las propiedades mecánicas de una espuma de aleación con memoria de forma (SMA), en particular se estudia las capacidades de amortiguamiento de la aleación CuALBe para diferentes amplitudes y frecuencias.

Los modelos de espumas utilizados en este trabajo tienen como porcentaje de porosidad 29,74%, 31,11%, 32,68%, 39,93% y 51,37%. Para evaluar las espumas y sus propiedades de SMA se usa el método de elementos finitos (MEF) por medio del software ANSYS 16.1

Este trabajo arroja como resultado que es posible evaluar un dispositivo liviano de disipación energía y estimar las propiedades mecánicas de la espuma CuALBe. Las conclusiones señalan mejoras en las capacidades de amortiguación en la aleación CuAlBe al generar espumas con estos materiales. En promedio el MEF muestra que la cantidad de porosidad óptima donde la capacidad de disipación de energía mecánica tiene resultados concluyentes para seguir con trabajos experimentales, es en espumas cercanas al 30%.

Abstract

This paper presents a numerical methodology to characterize the mechanical properties of foam shape memory alloy (SMA), In particular it studies the damping capabilities CuAlBe alloy to different amplitudes and frequencies studied.

The foam models used in this work are as a percentage of porosity 29.74%, 31.11%, 32.68%, 39.93% and 51.37%. To evaluate the foam properties of SMA and the finite element method (FEM) is used ANSYS 16.1 software.

The results of this work say that is possible to evaluate lightweight device power dissipation and estimate the mechanical properties of the foam CuAlBe. The findings indicate improved damping capabilities alloy CuAlBe to generate foams with these materials. The average of MEF shows that the optimum amount of porosity where the dissipation of mechanical energy is conclusive results to continue experimental analysis, foams is close to 30%.

Índice

Agradecimientos	ii
Resumen.....	iii
Abstract	iv
Índice de Figuras	viii
Índice de tablas.....	xviii
Simbología	xix
1 Introducción	1
2 Objetivos	2
3 Antecedentes	3
3.1 Aleaciones con memoria de forma	3
3.1.1 La transformación martensítica.....	5
3.1.2 Efecto de memoria de forma	9
3.1.3 Superelasticidad	11
3.1.4 Tipos de aleaciones con memoria de forma.....	17
3.2 Materiales porosos.....	19
3.2.1 Solidos celulares y espumas metálicas.....	19
3.2.2 Homogenización	22
3.2.3 Aplicaciones.....	24
3.3 Vibraciones Mecánicas.....	26
3.3.1 Respuesta a una excitación armónica sin amortiguamiento.....	26
3.3.2 Modelos de vibración con amortiguamiento.....	29
3.3.3 Coeficiente específico de amortiguamiento y factor de pérdida.....	32
3.3.4 Aislamiento de vibraciones.	35

3.3.5	Control de vibraciones	36
3.3.6	Amortiguamiento en aleaciones con memoria de forma.....	40
4	Estudio preliminar	45
4.1	Propiedades aleación CuAlBe	46
5	Metodología	51
5.1	Método de elementos finitos	51
5.1.1	Ecuación de movimiento para varios grados de libertad GDL	52
5.2	Geometrías de espumas	56
5.3	Enmallado.....	58
5.4	Propiedades del material CuAlBe	64
5.5	Condiciones de contorno del modelo	69
6	Resultados	78
6.1	Amplitud de 45 [KN]	78
6.1.1	Probeta maciza.	78
6.1.2	Probeta con 29,74% de porosidad.....	79
6.1.3	Probeta con 31,11 % de porosidad.....	80
6.1.4	Probeta con 32,68 % de porosidad.....	81
6.1.5	Probeta con 39,93 % de porosidad.....	82
6.1.6	Probeta con 51,37 % de porosidad.....	83
6.2	Amplitud de 42 [KN]	84
6.2.1	Probeta maciza.	84
6.2.2	Probeta con 29,74% de porosidad.....	85
6.2.3	Probeta con 31,11 % de porosidad.....	86
6.2.4	Probeta con 32,68 % de porosidad.....	87

6.2.5	Probeta con 39,93 % de porosidad.....	88
6.2.6	Probeta con 51,37 % de porosidad.....	89
6.3	Amplitud de 39 [KN]	90
6.3.1	Probeta maciza.	90
6.3.2	Probeta con 29,74% de porosidad.....	91
6.3.3	Probeta con 31,11 % de porosidad.....	92
6.3.4	Probeta con 32,68 % de porosidad.....	93
6.3.5	Probeta con 39,93 % de porosidad.....	94
6.3.6	Probeta con 51,37 % de porosidad.....	95
6.4	Amplitud de 36 [KN]	96
6.4.1	Probeta maciza.	96
6.4.2	Probeta con 29,74% de porosidad.....	97
6.4.3	Probeta con 31,11 % de porosidad.....	98
6.4.4	Probeta con 32,68 % de porosidad.....	99
6.4.5	Probeta con 39,93 % de porosidad.....	100
6.4.6	Probeta con 51,37 % de porosidad.....	101
7	Análisis de resultados.....	102
7.1	Variación del Área de histéresis en las probetas con porosidad.....	107
7.2	Variación del factor de pérdida (η) en las probetas con porosidad.....	112
7.2.1	Modelo con 29,74% de porosidad estudiado.	118
7.3	Gráficas comparativas de amortiguamiento para los modelos de porosidad.	122
7.4	Deformación máxima de los modelos en compresión.....	125
7.5	Módulos de Young en las geometrías en tracción.....	128

8	Conclusiones	130
9	Bibliografía	133
10	Anexos	135
10.1	Modelo CAD sin porosidad	135
10.2	Modelo CAD con 29,74% de porosidad	138
10.3	Modelo CAD con 31,11% de porosidad	141
10.4	Modelo CAD con 32,68% de porosidad	144
10.5	Modelo CAD con 39,93% de porosidad	147
10.6	Modelo CAD con 51,37% de porosidad	150

Índice de Figuras

Figura 1 :	Gráfica de Transformación de % en fase martensítica en ausencia de tensiones.	4
Figura 2:	Transformación de austenita a martensita esquemáticamente 2D. En (c) a medida que las capas avanzan, cada nivel de átomos se desplaza solo una pequeña distancia [2].....	6
Figura 3:	Fase martensita en diferentes tipos de organización en la aleación CuAl [3].	7
Figura 4 :	Representación de los cambios en las propiedades de un SMA vs la temperatura en una transformación martensítica, la fase madre austenita se representa con un cuadrado y la fase martensítica con un rombo [2].....	8
Figura 5:	Gráfica de descripción microscópica del efecto de memoria de forma, la austenita es enfriada para obtener martensita sin sufrir cambios en su forma, posteriormente se deforma (c). Calentando tanto el estado (b) como (c) se volverá a la estructura original austenítica [4].	9

Figura 6: Esquema macroscópico del efecto de memoria de forma [4].....	10
Figura 7: Gráfica esfuerzo vs deformación y la influencia de variadas temperaturas en alambres de NiTi [5].....	12
Figura 8: Secuencia de la martensita inducida por tensión en una aleación SMA CuALBe [3].....	13
Figura 9: Gráfica curva esfuerzo-.deformación de superelasticidad para un material SMA ideal a una temperatura $T > A_f$	14
Figura 10: Trayectorias mecánicas para diferentes temperaturas para las aleaciones con memoria de forma, se detallan las trayectorias de los tres estados de una aleación con memoria de forma. Para una $T < M_f$ se tiene el estado de memoria de forma simple, con $T > A_f$ el SMA se encuentra en la condición de superelasticidad, por ultimo para una $T > M_d$ el material se comporta como un material normal tensionado hasta su ruptura [6].	16
Figura 11 : Acoplamiento de tubería con aleación SMA NiTiFe, se puede observar en la imagen que el acople tiene un diámetro interior menor que la tubería, se expande en su estado martensítica hasta su montaje, luego cuando el tubo recupera su temperatura de trabajo este pasa a su estado original de austenita recuperando sus dimensiones y generando el ajuste necesario [7].	17
Figura 12: Diferencia esquemática entre un sólido celular y un material poroso.....	19
Figura 13: Diferencia entre un sólido celular y un material poroso. [9].....	20
Figura 14: Espuma de aluminio de poros abiertos. [10]	20
Figura 15: Espuma de aluminio de poros cerrados. [10]	21
Figura 16: Comparación entre una espuma de Zinc y un trozo de pan.....	21
Figura 17: Escala de homogenización.....	23
Figura 18: Prototipo de soporte de motor con núcleo de espuma metálica.	25
Figura 19: Compuesto de acero tipo sándwich con núcleo de espuma metálica.	25
Figura 20: Sistema masa resorte con excitación armónica.	26

Figura 21: Respuesta a una excitación no amortiguada con $f_0 = 1$, $\omega_n = 1 \text{ rad/s}$, $\omega = 4 \text{ rad/s}$.	28
Figura 22: (a) modelo de amortiguamiento viscoso (AV) (b) modelo de amortiguación por histéresis (AH).	29
Figura 23: Representación gráfica de una vibración con amortiguamiento, la sección en rojo de la gráfica representa la parte transiente y la azul su parte estacionaria en el tiempo [15].	32
Figura 24: Niveles de vibración permisibles RMS [16].	37
Figura 25: Tipos de control de vibraciones.	38
Figura 26: Ciclo de histéresis ideal de una material SMA.	41
Figura 27: Representación de la energía total aplicada a un material SMA.	42
Figura 28: Energía de descarga de tensiones o transformación inversa de un SMA.	42
Figura 29: Energía disipada por el ciclo de histéresis ideal en un material SMA.	43
Figura 30: Carta de comparación de SDC para diferentes familias de materiales. [18]	44
Figura 31: Clasificación de las aleaciones con memoria de forma con base de cobre.	46
Figura 32: Microestructura de barra de material CuAlBe de 3,4 mm de diámetro. (a) Sección longitudinal, (b) Sección transversal [19].	47
Figura 33: Microestructura en su fase martensítica de la aleación CuAlBe [20].	47
Figura 34: Curvas de tracción para diferentes niveles de deformaciones solicitadas	48
Figura 35: Curva esfuerzo- deformación a temperatura ambiente en aleación CuAlBe, para deformaciones impuestas de 2,5% y 3,3%.	49
Figura 36: Determinación de módulos de Young ($E(A)$, $E(d)$) y el esfuerzo de inicio de martensita, ensayo con una deformación impuesta de 2,5%.	49
Figura 37: Determinación de módulos de Young ($E(A)$, $E(d)$) y el esfuerzo de inicio de martensita, ensayo con una deformación impuesta de 3,3%.	50
Figura 38: Modelo de varios GDL.	52

Figura 39: Módulo para el análisis de los modelos de espumas CAD.....	55
Figura 40: Modelos de probetas CAD analizadas.....	57
Figura 41: Geometría del elemento SOLID186	58
Figura 42: Forma de los elementos de una malla.....	59
Figura 43: Referencia de la cual se deriva la matriz jacobiana, izquierda el espacio de referencia, derecha el enmallado real. [23]	60
Figura 44: Característica de la malla en ANSYS para el modelo CAD.....	62
Figura 45: Enmallado en modelo CAD espuma con 29,74 % de porosidad.....	63
Figura 46: Material superelástico en biblioteca de ANSYS.	64
Figura 47: Idealización en ANSYS del comportamiento superelástico de un material con memoria de forma SMA.....	65
Figura 48: Propiedades de elasticidad y densidad en ANSYS.....	66
Figura 49: Gráfica de calibración del modelo SMA en Ansys.	67
Figura 50: Comportamiento del material SMA CuAlBe en ANSYS para 4 diferentes deformaciones (1%, 2%, 3,3%, 4%).	68
Figura 51: Condición de contorno en base inferior con desplazamiento 0 [mm] en eje Z, la probeta tiene un 32,68% de porosidad.	69
Figura 52: Detalle de la condición de contorno en ANSYS.	70
Figura 53: Condición de contorno en cara superior desplazamiento remoto, la probeta tiene un 32,68% de porosidad.	70
Figura 54: Detalles de la condición de desplazamiento remoto en ANSYS.....	71
Figura 55: Deformaciones generadas de una probeta maciza en MEF para cada amplitud del análisis. Deformaciones de 2,9%; 2,6%; 1,9%; 1,5% para amplitudes de 45 [KN], 42 [KN], 39[KN], 36 [KN] respectivamente.....	72
Figura 56: Carga sinusoidal con una amplitud de 45 [KN] para frecuencias de 25 Hz, 50 Hz y 75 Hz.....	73
Figura 57: Carga sinusoidal con una amplitud de 45 [KN] para frecuencias de 100 Hz, 125 Hz y 150 Hz.	73

Figura 58: Detalle del periodo en ANSYS.....	74
Figura 59: Periodo de 0,04 [s] divididos en 50 Steps iguales, ANSYS.	75
Figura 60: Detalle del ITS en ANSYS.....	76
Figura 61: Fuerza (línea azul) distribuida en el tiempo para el análisis de ANSYS..	76
Figura 62: Condición de contorno en cara superior, la probeta tiene un 32,68% de porosidad.	77
Figura 63: Curva esfuerzo vs deformación de probeta maciza.	78
Figura 64: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 29,74 % de porosidad. .	79
Figura 65: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 31,11 % de porosidad. .	80
Figura 66: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 32,68 % de porosidad. .	81
Figura 67: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 39,93 % de porosidad. .	82
Figura 68: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 51,37 % de porosidad. .	83
Figura 69: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta maciza.	84
Figura 70: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 29,74 % de porosidad. .	85
Figura 71: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 31,11 % de porosidad. .	86
Figura 72: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 32,68 % de porosidad. .	87
Figura 73: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 39,93 % de porosidad. .	88
Figura 74: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 51,37 % de porosidad. .	89
Figura 75: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta maciza.	90
Figura 76: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 29,74 % de porosidad. .	91
Figura 77: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 31,11 % de porosidad. .	92
Figura 78: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 32,68 % de porosidad. .	93
Figura 79: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 39,93 % de porosidad. .	94
Figura 80: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 51,37 % de porosidad. .	95
Figura 81: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta maciza.	96
Figura 82: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 29,74% de porosidad. ..	97
Figura 83: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 31,11% de porosidad. ..	98

Figura 84: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 32,68% de porosidad. ..	99
Figura 85: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 39,93% de porosidad. 100	
Figura 86: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 51,37% de porosidad. 101	
Figura 87: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 45 [KN] y 25 Hz en diferentes % porosidad. .	103
Figura 88: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 45 [KN] y 125 Hz en diferentes % porosidad. 103	
Figura 89: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 42 [KN] y 25 Hz en diferentes % porosidad ..	104
Figura 90: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 42 [KN] y 125 Hz en diferentes % porosidad. 104	
Figura 91: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 39 [KN] y 25 Hz en diferentes % porosidad. .	105
Figura 92: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 39 [KN] y 125 Hz en diferentes % porosidad. 105	
Figura 93: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 36 [KN] y 25 Hz en diferentes % porosidad. .	106
Figura 94: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 36 [KN] y 125 Hz en diferentes % porosidad. 106	
Figura 95: Área de histéresis variando la frecuencia con una amplitud de 45 KN en cada probeta.....	107
Figura 96: Área de histéresis variando la frecuencia con una amplitud de 42 [KN] en cada probeta.....	108
Figura 97: Área de histéresis variando la frecuencia con una amplitud de 39 [KN] en cada probeta.....	109
Figura 98: Área de histéresis variando la frecuencia con una amplitud de 36 [KN] en cada probeta.....	109
Figura 99: Área de histéresis variando la fuerza amplitud de la vibración con una frecuencia de 25 Hz, para cada probeta.....	111
Figura 100: Área de histéresis variando la fuerza amplitud de la vibración con una frecuencia de 150 Hz, para cada probeta.....	111
Figura 101: Loss factor η con una amplitud de 45 [KN], en función de la frecuencia de excitación para los modelos calculados.....	112
Figura 102: Loss factor η con una amplitud de 42 [KN], en función de la frecuencia de excitación para los modelos calculados.....	114

Figura 103: Loss factor η con una amplitud de 39 [KN], en función de la frecuencia de excitación para los modelos calculados.....	115
Figura 104: Loss factor η con una amplitud de 36 [KN], en función de la frecuencia de excitación para los modelos calculados.....	115
Figura 105: Factor de pérdida (η) para cada fuerza de amplitud de vibración, con una frecuencia de 25 Hz, para cada probeta.....	116
Figura 106: Factor de pérdida (η) para cada fuerza de amplitud de vibración, con una frecuencia de 150 Hz, para cada probeta.....	117
Figura 107: Factor medio de pérdida (η) para los modelos con porosidad de 29,74%, 31,11% y 32,68%.	118
Figura 108: Factor de pérdida (η) promedio para la amplitud de 36 [KN].....	119
Figura 109: Gráfica esfuerzo vs deformación para el modelo sin porosidad y con un 29,75%, modelado con una amplitud de 36 [KN] en una frecuencia de 25 Hz.	120
Figura 110: Valores de los factores de pérdida para cada amplitud aplicada a 25 Hz, resultados en modelos de 29,74% y maciza.	121
Figura 111: Box plot de los valores de histéresis para los diferentes modelos porosos y macizo.	123
Figura 112: Box plot de los valores de factor de pérdida (η) para los diferentes modelos porosos y el sin porosidad.....	124
Figura 113: Deformación máxima en compresión de los modelos para cada amplitud, con 50 Hz de frecuencia de excitación.	125
Figura 114: Gráficos de compresión, aplicado con una vibración de 45[KN] y 50 Hz.	127
Figura 115: Representación del módulo de Young en gráfica esfuerzo vs deformación, modelo macizo y 31,11% de porosidad.	128
Figura 116: Modulo de Young para el nivel de porosidad en las probetas, mediciones con amplitudes de 45 [KN] y 36 [KN].	129

Figura 117: Presenta la geometría de la probeta con su respectivo mallado.	135
Figura 118: Cantidad de nodos y elementos en el modelo macizo.	135
Figura 119: Estadística Métrica de Malla Element Quality, probeta sin porosidad.	136
Figura 120: Histograma de Métrica de Malla Element Quality, probeta sin porosidad.	136
Figura 121: Estadística Métrica de Malla Skewness, de probeta maciza.	136
Figura 122: Histograma de Métrica de Malla Skewness, de probeta maciza.	136
Figura 123: Estadística Métrica de Malla Jacobian Ratio, de probeta maciza.....	137
Figura 124: Histograma de Métrica de Malla Jacobian Ratio, de probeta maciza. .	137
Figura 125: Presenta la geometría de la probeta con su respectivo mallado.	138
Figura 126: Cantidad de nodos y elementos en el modelo con 29,74% de porosidad.	138
Figura 127: Estadística Métrica de Malla Element Quality, probeta con 29,74% de porosidad.	139
Figura 128: Histograma de Métrica de Malla Element Quality, probeta con 29,74% de porosidad.	139
Figura 129: Estadística Métrica de Malla Skewness, modelo 29,74% de porosidad.	139
Figura 130: Histograma de Métrica de Malla Skewness, modelo 29,74% de porosidad.	139
Figura 131: Estadística Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 29,74% de porosidad.	140
Figura 132: Histograma de Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 29,74% de porosidad.	140
Figura 133: Presenta la geometría de la probeta con su respectivo mallado.	141
Figura 134: Cantidad de nodos y elementos en el modelo con 31,11% de porosidad.	141

Figura 135: Estadística Métrica de Malla Element Quality, modelo de 31,11% de porosidad.	142
Figura 136: Histograma de Métrica de Malla Element Quality, probeta con 31,11% de porosidad.	142
Figura 137: Estadística Métrica de Malla Skewness, modelo de 31,11% porosidad.	142
Figura 138: Histograma de Métrica de Malla Skewness, probeta con 31,11% de porosidad.	142
Figura 139: Estadística Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 31,11% porosidad.	143
Figura 140: Histograma de Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 31,11% de porosidad.	143
Figura 141: Presenta la geometría de la probeta con su respectivo mallado.	144
Figura 142: Cantidad de nodos y elementos en el modelo con 32,68% de porosidad.	144
Figura 143: Estadística Métrica de Malla Element Quality, probeta con 32,68% de porosidad.	145
Figura 144: Histograma de Métrica de Malla Element Quality, probeta con 32,68% de porosidad.	145
Figura 145: Estadística Métrica de Malla Skewness, probeta con 32,68% porosidad.	145
Figura 146: Histograma de Métrica de Malla Skewness, probeta con 32,68% de porosidad.	145
Figura 147: Estadística Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 32,68% porosidad.	146
Figura 148: Histograma de Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 32,68% de porosidad.	146
Figura 149: Presenta la geometría de la probeta con su respectivo mallado.	147

Figura 150: Cantidad de nodos y elementos en el modelo con 39,93% de porosidad.	147
Figura 151: Estadística Métrica de Malla Element Quality, probeta con 39,93% de porosidad.	148
Figura 152: Histograma de Métrica de Malla Element Quality, probeta con 39,93% de porosidad.	148
Figura 153: Estadística Métrica de Malla Skewness, modelos de 39,93% porosidad.	148
Figura 154: Histograma de Métrica de Malla Skewness, probeta con 39,93% de porosidad.	148
Figura 155: Estadística Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 39,93% porosidad.	149
Figura 156: Histograma de Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 39,93% de porosidad.	149
Figura 157: Presenta la geometría de la probeta con su respectivo mallado.	150
Figura 158: Cantidad de nodos y elementos en el modelo con 51,37% de porosidad.	150
Figura 159: Estadística Métrica de Malla Element Quality, modelo de 51,37% porosidad.	151
Figura 160: Histograma de Métrica de Malla Element Quality, modelo de 51,37% porosidad.	151
Figura 161: Estadística Métrica de Malla Skewness, modelo de 51,37% porosidad.	151
Figura 162: Histograma de Métrica de Malla Skewness, modelo de 51,37% porosidad.	151
Figura 163: Estadística Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 51,37% de porosidad.	152

Figura 164: Histograma de Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 51,37% porosidad.	152
---	-----

Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades de las aleaciones con memoria de forma [2].	18
Tabla 2 : Definiciones de amortiguamiento	34
Tabla 3: Conversiones exactas de amortiguamiento.	35
Tabla 4: Rango de amplitudes y frecuencias en vibraciones.	37
Tabla 5: Indicador de calidad de malla a partir del <i>Skewness</i>	60
Tabla 6: Parámetros del material SMA superelástico.	65
Tabla 7: Propiedades de entrada CuALBe	66
Tabla 8: Diferencias en la compresión entre las frecuencias de 150 Hz y 50 Hz, en cada modelo.....	126

Simbología

SMA: Aleación con memoria de forma.

MEF: Método de elementos finitos.

Cu: Cobre.

Al: Aluminio

Be: Berilio.

M: Fase martensita.

β : Fase austenita.

Ms: Temperatura de inicio transformación martensita.

Mf: Temperatura de fin transformación martensita.

As: Temperatura de inicio transformación austenita.

Af: Temperatura de fin transformación austenita.

Md: Temperatura máxima para inducir martensita por tensión.

E(A): Módulo de Young austenita.

σ_s^{AS} : Tensión de inicio transformación martensítica.

σ_f^{AS} : Tensión de fin transformación martensítica.

σ_s^{SA} : Tensión de inicio transformación martensítica inversa.

σ_f^{SA} : Tensión de fin transformación martensítica inversa.

$\bar{\epsilon}_L$: Deformación residual máxima superelástico.

α : Parámetro de diferencia entre compresión y tensión.

ρ : Densidad del material.

T : Temperatura.

σ_z : Esfuerzo en el eje Z.

ε : Deformación.

w : Frecuencia angular

w_n : Frecuencia natural.

m : masa

k : Constante de rigidez

ζ : Factor de amortiguamiento.

η : Factor de pérdida.

GPa: Gigapascal.

MPa: Megapascal.

°C: Grados Celsius.

Hz: Hertz.

J: Joule.

Kg: Kilogramos.

N: Newton.

ΔW : Energía disipada.

1 Introducción

Las espumas metálicas son gran de interés en diferentes áreas de la ingeniería, las múltiples ventajas que presentan este tipo de materiales hacen que sean potencialmente atractivas para su investigación, tales como estructuras livianas, filtros, implantes óseos, aislantes térmico, elementos que absorben energía, entre otros. Su aparente capacidad para contener cargas cíclicas, como vibraciones con diferentes frecuencias, es la hipótesis a comprobar en este trabajo.

Por otro lado las aleaciones con memoria de forma (SMA), son materiales capaces de sufrir niveles de deformaciones entre 3% - 10% y volver a su forma original. Estos materiales tienen dos comportamientos fundamentales, el primer estado es que partiendo de una forma inicial pueden ser deformados para luego al aplicarles un calentamiento, volver a su forma original, esta propiedad se conoce como memoria de forma. El segundo comportamiento es que dentro de un determinado rango de temperaturas pueden deformarse y luego volver a su forma original al ser descargados, logrando una importante capacidad de absorber energía, esta condición se conoce como superelasticidad y es usada para la disipación de energía [2]. La aleación SMA CuAlBe es el material de estudio en este trabajo pues tiene un comportamiento superelástico a temperaturas ambientes, su capacidad para absorber energía es de importancia para el control de vibraciones

Resulta de interés estudiar las capacidades de amortiguamiento que se logran al tener una espuma metálica de una aleación de CuAlBe, la adición de cobre en la aleación es de importancia para el estudio, debido a que para Chile es fundamental la diversificación en el uso de este material, el valor agregado que se obtiene al generar nuevas aplicaciones de base de cobre contribuye con el desarrollo del país.

2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo de título es estudiar numéricamente, mediante el Método de Elementos Finitos (MEF), el efecto de la morfología y distribución de la porosidad sobre las características de amortiguación de vibraciones en espumas metálicas en base a la aleación con memoria de forma CuAlBe para su aplicación en dispositivos livianos de disipación de energía.

Con el desarrollo de este trabajo también se busca estimar las propiedades mecánicas de las espumas de CuAlBe reduciendo los costos asociados al posterior desarrollo experimental.

Para cumplir el propósito antes señalado se deben abordar los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un modelo 3D de las espumas de la aleación con memoria de forma CuAlBe.
- Caracterizar numéricamente las propiedades mecánicas de la espuma utilizando un software comercial como herramienta de análisis.
- Caracterizar numéricamente la amortiguación de la espuma en función de la frecuencia de excitación.
- Analizar los resultados obtenidos para diferentes morfologías y distribuciones de poros.

3 Antecedentes

3.1 Aleaciones con memoria de forma

Las aleaciones con memoria de forma (SMA) “*Shape memory alloy*” son materiales metálicos que luego de una deformación aparentemente plástica vuelven a su forma original tras un calentamiento, a su vez estos materiales dentro de un determinado rango de temperaturas pueden deformarse hasta casi un 10 % y luego volver su forma original al restirar las cargas aplicadas para deformarlo. Estas dos propiedades anteriormente expuestas se conocen como efecto de memoria de forma y superelasticidad. [2]

En el mercado existen un variado número de aleaciones con memoria de forma en los que destacan una aleación de níquel titanio conocida como Nitinol (NiTi) y las aleaciones con base de cobre entre las conocidas se encuentra el SMA CuALBe y CuALZn.

Las SMA presentan un comportamiento complejo en las variables esfuerzo-deformación – temperatura que es simplificado de acuerdo a diferentes trayectorias particulares. La base de las transformaciones de estos materiales es el cambio de su fase martensita fácilmente, para entender las características de los SMA es necesario conocer los principios básicos de la martensita, los cambios en las características cristalográficas generan las propiedades descritas, la aleación puede estar en fase martensítica o en fase austenítica. La fase austenítica es la más estable a altas temperaturas y bajos niveles de tensión, este estado cristalográfico tiene una alta simetría. Por otro lado la fase martensítica es asimétrica, es usualmente la fase estable a bajas temperaturas y altos niveles de tensión, el comportamiento que tengan los SMA se debe al hecho de que las transformaciones en ambos estados son posibles,

estas variaciones en su estructura cristalina se pueden hacer por medio de calentamiento-enfriamiento y/o carga-descarga.

Cuando las SMA se encuentran en ausencia de tensiones, la cantidad porcentual de fase austenita y/o martensita depende de la temperatura ambiente, la Figura 1 presenta el ciclo de temperaturas típico de una SMA.

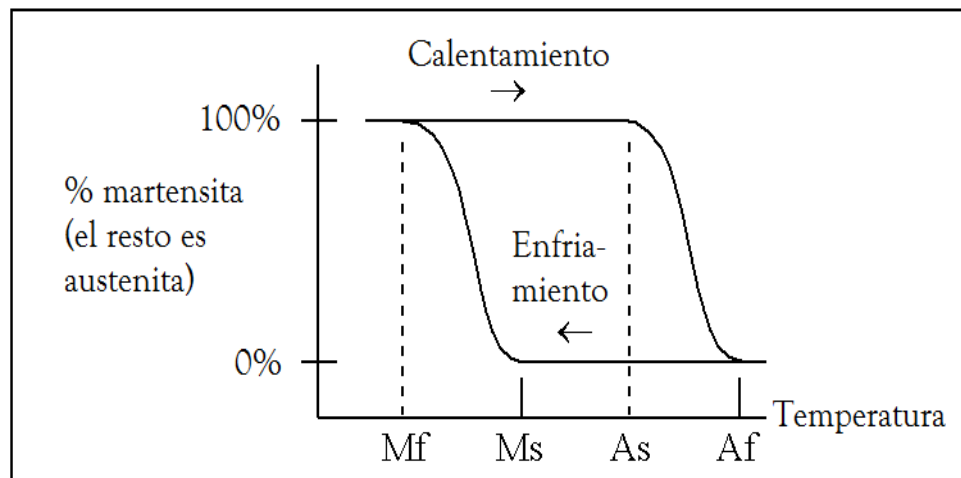


Figura 1 : Gráfica de Transformación de % en fase martensítica en ausencia de tensiones.

En la Figura 1 se distinguen cuatro temperaturas: Ms y Mf temperaturas de inicio y fin de la transformación martensítica respectivamente; y As y Af temperatura de inicio y fin de la transformación austenítica respectivamente.

3.1.1 La transformación martensítica

Las transformaciones de estado de los sólidos son de dos tipos; difusión y desplazamiento [2].

La transformación por difusión es aquella en la cual se puede transformar una nueva fase moviendo átomos aleatoriamente a distancias relativamente grandes, se requiere de un alto grado de difusión atómica puesto que la nueva fase que se forma tiene diferente composición química que la matriz de origen. Debido que se requiere de un movimiento atómico, las transformaciones de este tipo dependen del tiempo y la temperatura

La transformación por desplazamiento no requiere de un amplio rango de movimiento, en este caso los átomos se ordenan para llegar a una estructura cristalina más estable pero sin cambiar las naturalezas químicas de esta, ya que no requieren estas transformaciones de una migración atómica, estas son por lo general independientes del tiempo, y el movimiento entre las dos fases es rápida siendo limitadas por la velocidad del sonido. Las transformaciones martensíticas de las aleaciones con memoria de forma son generalmente por desplazamiento, y se forman enfriando de una fase madre, matriz o austenita.

Desde el punto de vista de la fase cristalina, la transformación de austenita a martensita puede explicarse en dos partes, la primera parte consiste en todos los movimientos atómicos necesarios para producir la nueva estructura a partir de la antigua. La segunda parte de la transformación martensítica es un paso de acomodación, la estructura martensítica producida anteriormente es de diferente forma que la austenita que aún no se transforma en la nueva fase. La martensita de los aceros implica un cambio de forma y volumen, en el caso de los SMA es solo un cambio de forma.

En la Figura 2 se esquematiza la estructura austenita(a) y su progresión a una estructura martensita (b) a (d), se nota que a medida que la transformación avanza cada capa de átomos se desplaza tan solo una pequeña distancia.

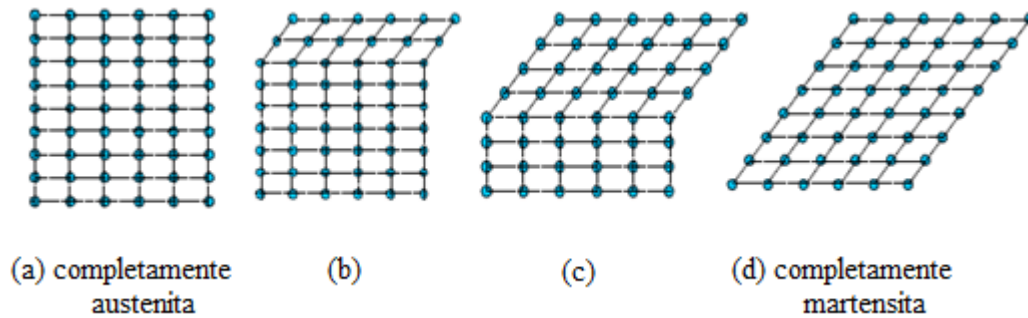


Figura 2: Transformación de austenita a martensita esquemáticamente 2D. En (c) a medida que las capas avanzan, cada nivel de átomos se desplaza solo una pequeña distancia [2].

Desde un punto de vista macroscópico todas las propiedades físicas prácticamente de la austenita y martensita son diferentes es por ello que a medida que se atraviesa el punto de transformación mediante una variación de temperatura aparecen una gran variedad de cambios en las propiedades significativas. La estructura interna de la fase martensita es muy compleja. La Figura 3 exhibe diferentes niveles de organización de la martensita para diferentes escalas de observación en una aleación SMA CuAl.

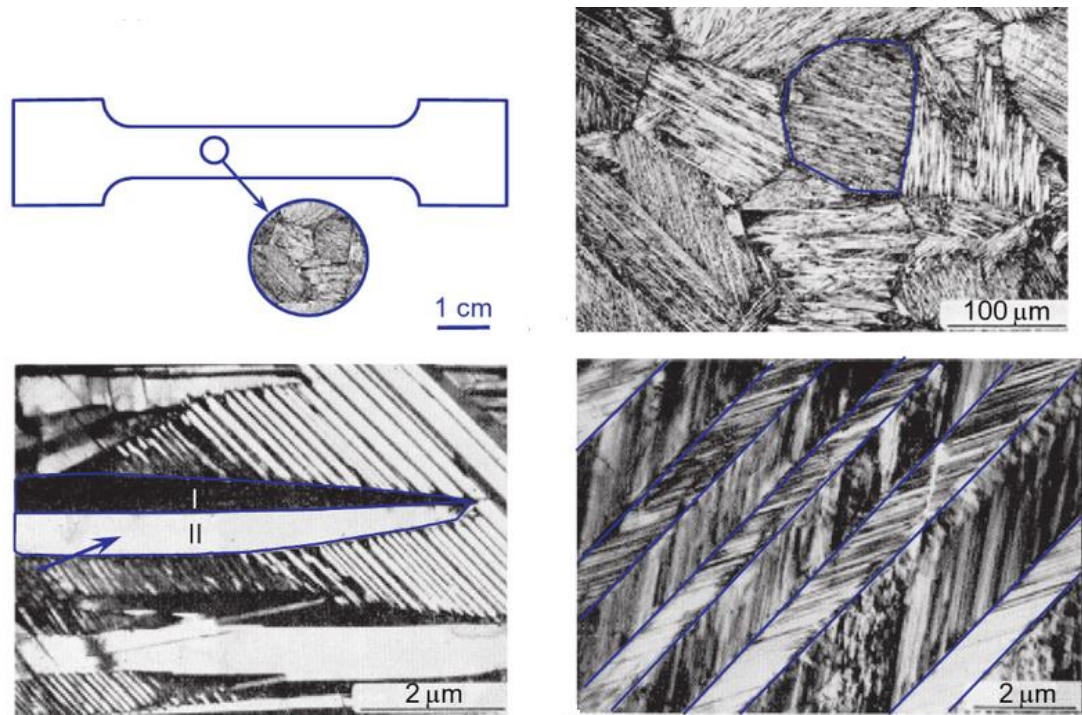


Figura 3: Fase martensita en diferentes tipos de organización en la aleación CuAl [3].

La temperatura es la variable fundamental en los SMA pues en la que se encuentre el material dependerá del tipo de comportamiento que este exhiba. Las temperaturas M_s , M_f , A_s y A_f que se indican en el Figura 4 se refieren a las que en la transformación martensítica empieza y acaba, y a su vez en que la transformación austenítica empieza y termina. No existe una determinada temperatura en donde ocurren estos sucesos sino un rango denominado temperaturas de transformación.

En la figura 4 el proceso de enfriamiento en M_s empieza a formarse martensita. Esta transformación termina a medida que decrece a una temperatura cercana a M_f . Las siguientes temperaturas son la de inicio y final de la transformación austenítica A_s y A_f respectivamente, la formación de la fase austenítica empieza a medida que la aleación empieza a elevar su temperatura alcanzando A_s , se empieza a formar una estructura cristalina cubica, rígida y dura que se termina de formar cercano a A_f .

Cuando el material se lleva a temperaturas superiores a Af la aleación recupera sus deformaciones completamente obteniendo el efecto de memoria de forma.

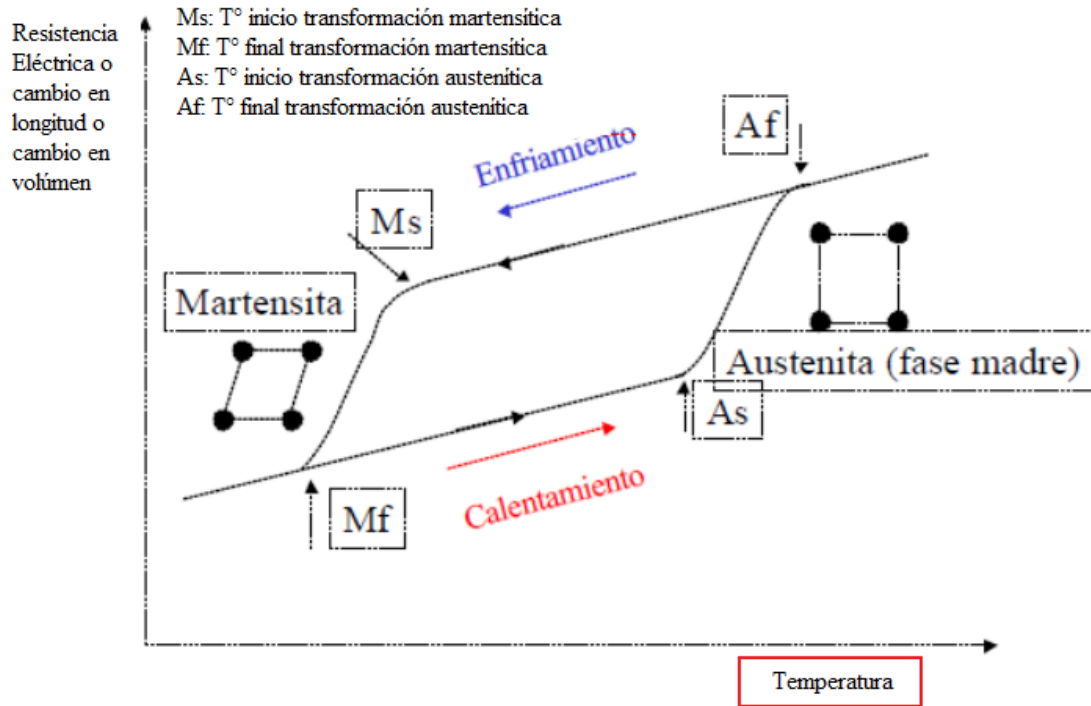


Figura 4 : Representación de las propiedades de un SMA vs la temperatura en una transformación martensítica, la fase madre austenita se representa con un cuadrado y la fase martensítica con un rombo [2].

3.1.2 Efecto de memoria de forma

El efecto de memoria de forma es la propiedad de los SMA en donde se tiene la capacidad de ser deformados y luego aplicar un calentamiento vuelven a su forma original. La martensita es una fase menos simétrica que la austenita, la explicación de esto es que hay muchas maneras en que se puede formar martensita a partir de la austenita, pero solo un camino volverá a la estructura austenítica. En el ejemplo del Figura 5 se pueden aplicar dos direcciones cortantes a los cuadrados que producirán dos posibles formas de romboides pero como no hay dos formas de austenita, ambas formas deberían volver a la misma estructura geométrica cuadrada mostrada en la Figura 5. Este concepto geométrico es la base del efecto de memoria de forma.

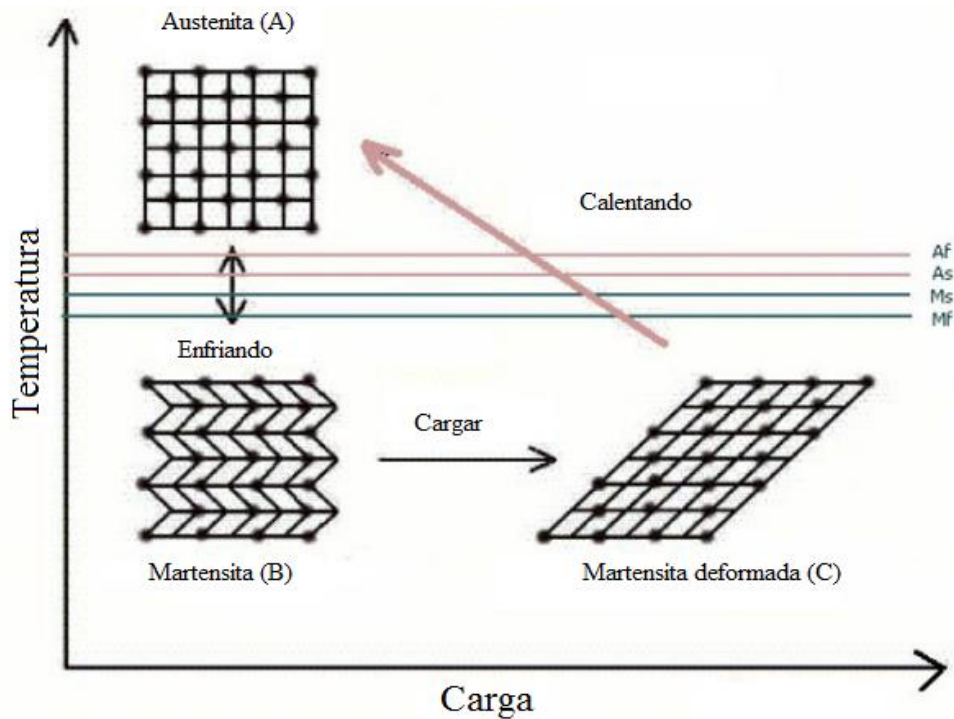


Figura 5: Gráfica de descripción microscópica del efecto de memoria de forma, la austenita es enfriada para obtener martensita sin sufrir cambios en su forma, posteriormente se deforma (c). Calentando tanto el estado (b) como (c) se volverá al estructura original austenítica [4].

Mirado de una manera macroscópica el efecto de memoria de forma también puede describirse como en la Figura 6. No hay un cambio de forma cuando el elemento es enfriado desde A_f hasta por debajo de M_f , cuando el elemento es deformado por debajo de M_f permanece con esa deformación hasta que se calienta, la recuperación de su forma original comienza en A_s y es completada en A_f . Una vez que recupera la forma en A_f , no tiene cambios en su forma si es nuevamente enfriado hasta por debajo de M_f por lo que la memoria de forma solo puede volverse a generar deformando la martensita nuevamente.

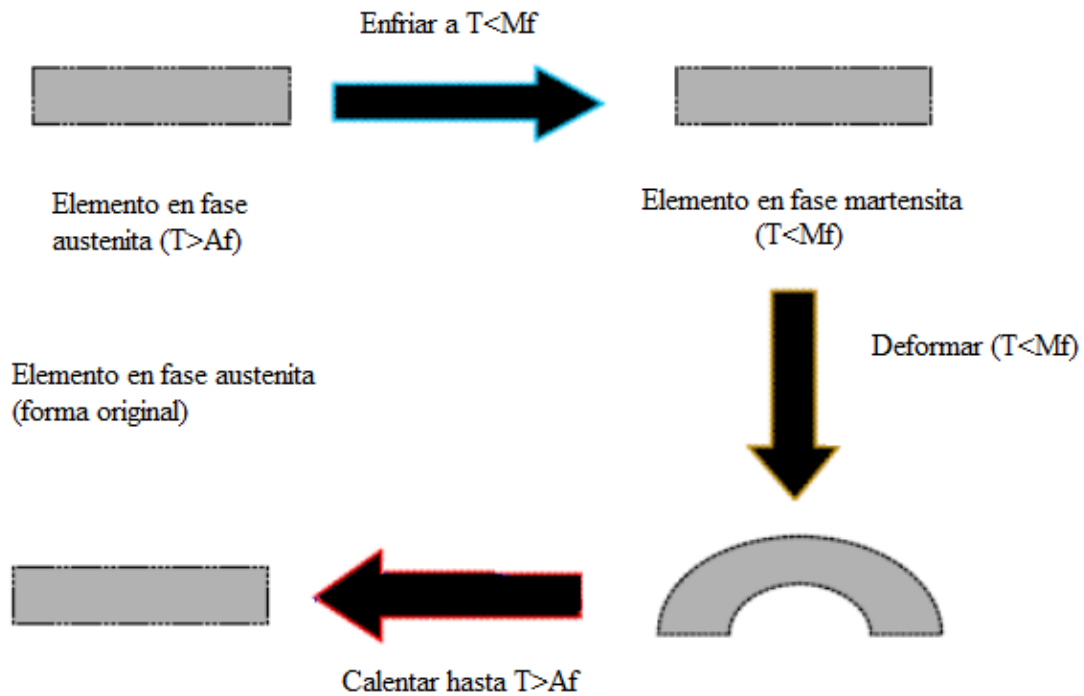


Figura 6: Esquema macroscópico del efecto de memoria de forma [4].

3.1.3 Superelasticidad

El efecto de superelasticidad es la propiedad de los SMA para volver a su forma en donde tienen la capacidad de ser deformados por una carga y luego al retirarla volver a su forma original con deformaciones logradas de hasta un 10%, mucho más que en los metales convencionales. [1]

Para efectos de este estudio la característica de superelasticidad en las aleaciones con memoria de forma además de la capacidad de absorber energía mecánica de las espumas metálicas, es el objeto del trabajo.

Cuando se deforma un SMA en estado austenítico, siendo este comportamiento independiente de la temperatura, la martensita inducida por tensión a partir de la fase austenita permite generar grandes deformaciones en el material que se recuperan cuando se elimina la carga.

Normalmente en el enfriamiento por debajo de la temperatura M_s puede generarse martensita bajo ninguna tensión, pero ese mismo material por sobre una temperatura M_s y aplicando una tensión se puede generar martensita, esta es la inducida por tensión, en este caso la variable generadora de esta nueva fase es mecánica.

Por encima de M_s la tensión necesaria para producir martensita incrementa con la temperatura, la variación de la tensión necesaria para producir martensita incrementa linealmente con la temperatura por encima de M_s . Esta relación obedece a la ecuación de Clausius- Clapeyron. [2]

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H}{\Delta V} \quad (1)$$

donde P es la presión, T la temperatura, ΔH calor latente de transformación y ΔV cambio de volumen de la transformación.

El incremento de la tensión para inducir martensita continua creciendo con la temperatura hasta M_d , la Figura 7 muestra la influencia de la temperatura en la transformación de martensita en una aleación NiTi, a medida que aumenta la temperatura el material necesita de una mayor tensión para generar martensita.

A temperaturas mayores a M_d la tensión crítica necesaria para formar martensita es mayor que la que se necesita para producir dislocaciones en el material, por ende la temperatura máxima para producir martensita inducida por tensión es la M_d , por lo que el rango de temperaturas es entre M_s y M_d . Por otro lado a partir de la Figura 7 el área (histéresis) que encierra las curvas se mantienen constantes, lo que se puede considerar como un indicador que es independiente de la temperatura

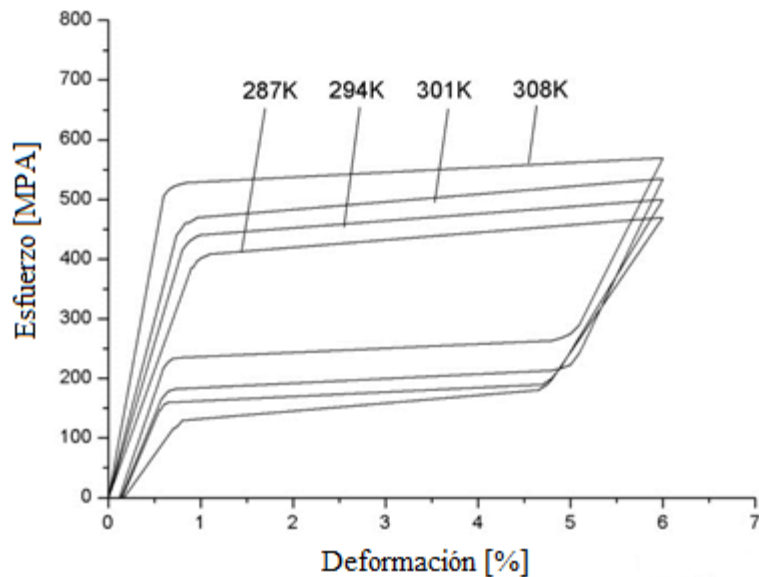


Figura 7: Gráfica esfuerzo vs deformación y la influencia de variadas temperaturas en alambres de NiTi [5].

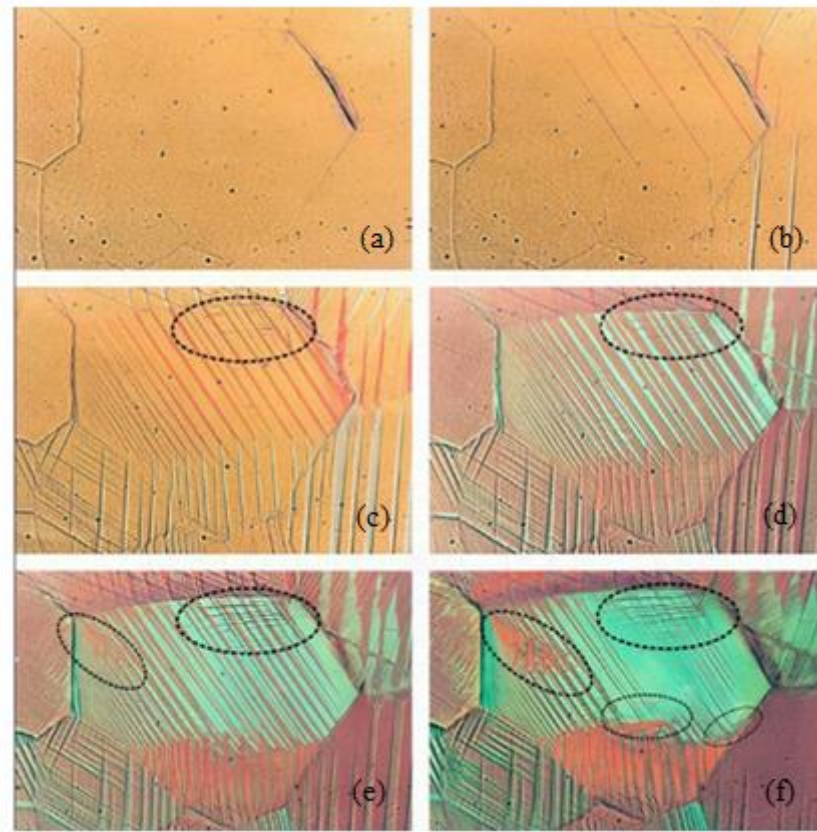


Figura 8: Secuencia de la martensita inducida por tensión en una aleación SMA CuALBe [3].

La Figura 8 muestra una fotografía de la secuencia de orientación que tiene la martensita inducida por tensión para una temperatura $M_s = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ en una aleación CuALBe.

En la temperatura A_f (austenita final) la martensita inducida por tensión se comporta de manera más estable y cuando el material es descargado la martensita generada vuelve a la fase austenita, la Figura 9 muestra el comportamiento ideal de un material SMA bajo tensión en su estado de superelasticidad. Las líneas encerradas destacadas son de esfuerzo en martensita a medida que la tensión aumenta.

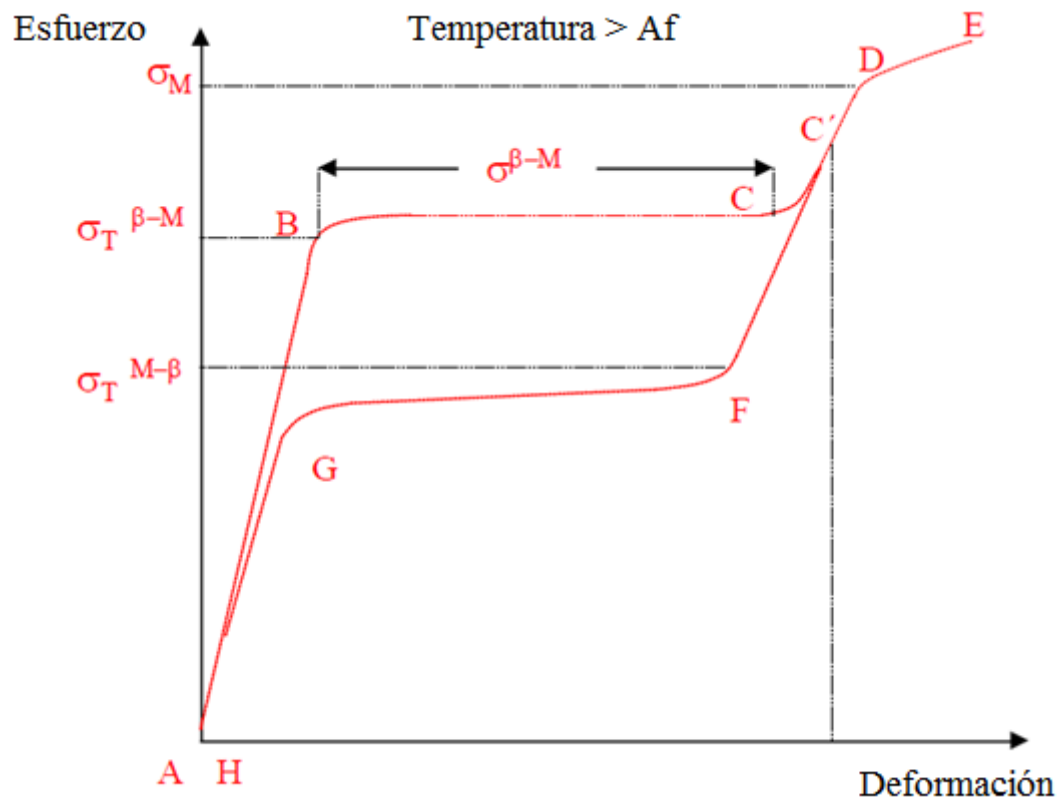


Figura 9: Gráfica curva esfuerzo-deformación de superelasticidad para un material SMA ideal a una temperatura $T > A_f$.

La Figura 9 es una representación ideal de un material SMA en estado de superelasticidad a una temperatura superior a A_f , el estado inicial es de fase austenita (β), AB es el tramo de deformación elástica desde la fase inicial, el esfuerzo $\sigma_T^{\beta-M}$ marca el inicio de la transformación martensítica (M), el punto C se concluye la transformación martensítica, la pendiente del tramo BC representa la tasa de generación de martensita inducida por tensión, si se sigue aumentando la tensión el material se estabiliza en una fase de totalmente martensítica y continua deformándose elásticamente en el tramo CD hasta llegar al límite elástico σ_M de martensita en el punto D, luego el material se sigue deformando plásticamente hasta su ruptura. Si la tensión decrece antes de llegar al punto D en el grafico el punto C', la deformación se recupera en diferentes etapas. El primer tramo CF corresponde a una recuperación

elástica de la martensita, en el punto F para el esfuerzo $\sigma_T^{M-\beta}$ se inicia la transformación inversa es decir la martensita vuelve a su fase austenita concluyendo totalmente su transformación inversa en el punto G, por último en el tramo GH se recupera el tramo elástico de la fase austenita hasta llegar a su fase madre.

Se conoce como comportamiento superelástico si la deformación generada se recupera totalmente, por el contrario se denomina comportamiento pseudoelástico si la recuperación es parcial. Por otro lado el área limitada por la curvas de carga y descarga proporciona información sobre la energía disipada en el ciclo mecánico o ciclo de histéresis.

Del comportamiento pseudoelástico de las SMA se pueden remarcar las siguientes características.

- Una zona de alta rigidez inicial correspondiente a la deformación elástica de la austenita.
- Una zona de transformación martensítica a tensión constante o a una baja pendiente, donde se alcanzan grandes deformaciones alrededor del 4% - 10%.
- Una segunda zona de alta rigidez correspondiente a la zona elástica de la martensita
- Deformación residual cercana a cero al retirar la carga
- Un ciclo de histéresis
- Una tensión constante o de baja pendiente de la transformación inversa de martensita a austenita.

A modo de resumen los materiales con memoria de forma presentan un comportamiento complejo en el espacio esfuerzo-deformación-temperatura (σ - ϵ -T), que se explica a través de las trayectorias anteriormente descritas, la Figura 10 representa los estados de memoria de forma simple, superelasticidad y material

normal tensionado hasta su ruptura. El comportamiento superelástico que se mencionó anteriormente, constituye el caso de interés en el presente estudio.

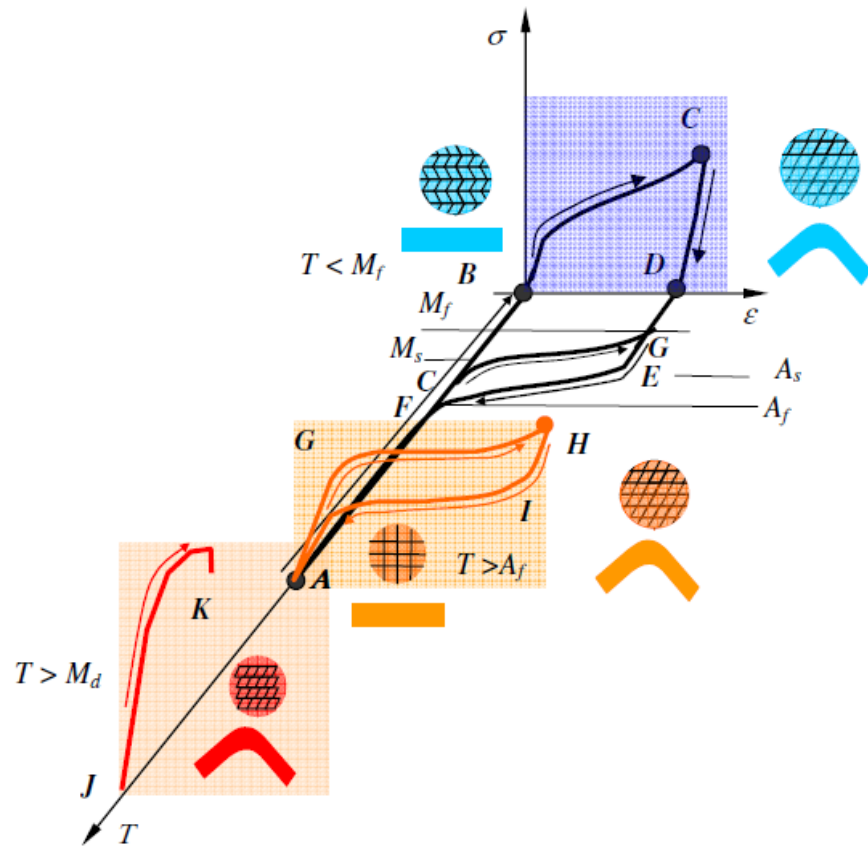


Figura 10: Trayectorias mecánicas para diferentes temperaturas para las aleaciones con memoria de forma, se detallan las trayectorias de los tres estados de una aleación con memoria de forma. Para una $T < M_f$ se tiene el estado de memoria de forma simple, con $T > A_f$ el SMA se encuentra en la condición de superelasticidad, por ultimo para una $T > M_d$ el material se comporta como un material normal tensionado hasta su ruptura [6].

3.1.4 Tipos de aleaciones con memoria de forma.

Existen una variada cantidad de tipos de aleaciones que cumplen con las propiedades anteriormente descritas, pero solo pocas han sido desarrolladas comercialmente. Las aleaciones más conocidas son las de Níquel Titanio conocido como Nitinol y las de base de Cobre.

El uso de las aleaciones con memoria de forma es muy variado: fusibles térmicos, detectores y accionador de dispositivos de control térmico como alambres contra incendios, anillos de ensamblaje rápido de tuberías, el sector biomédico es el que más emplea aleaciones con memoria de forma. La Tabla 1 detalla las propiedades y características físicas de las principales aleaciones con memoria de forma.

Las SMA están en constante estudio por sus capacidades de memoria y superelasticidad en donde se pueden usar en innumerables aplicaciones

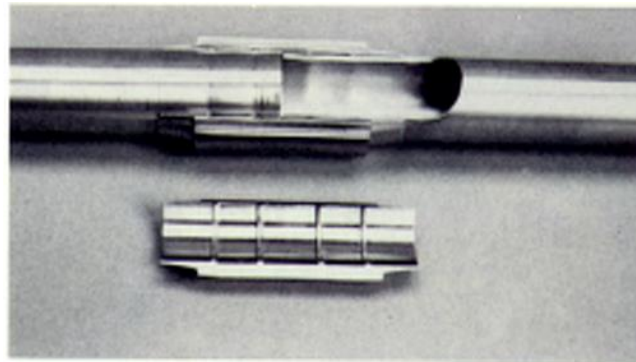


Figura 11 : Acoplamiento de tubería con aleación SMA NiTiFe, se puede observar en la imagen que el acople tiene un diámetro interior menor que la tubería, se expande en su estado martensítica hasta su montaje, luego cuando el tubo recupera su temperatura de trabajo este pasa a su estado original de austenita recuperando sus dimensiones y generando el ajuste necesario [7].

Tabla 1: Propiedades de las aleaciones con memoria de forma [3].

SMA comercializables	NiTi-base	Cu-base	Fe-base
Ejemplos de aleaciones	NiTi	CuAlMn	FeNiCoAlTaB
	NiTiCu	CuAlBe	FeMnAlNi
	NiTiNb	CuALNi	FeMnSi
	NiTiAg	CuZnAl	
Características SMA			
Rango de trasformación (°C)	-200 a +200	-200 a +200	-200 a +150
Histéresis (°C)	2 - 50	5 - 40	
$d\sigma / dt$ (Mpa/°C)	6.0 - 8.0	1.5 - 3.5	0.5 - 3.0
Entropía específica (J/kg)	12 - 32	7 - 9	
Temperatura máxima de sobrecalentamiento	400	300	
Tensión máxima de recuperación (Mpa)	600-900	400 - 700	400
Coefficiente específico de amortiguamiento (SDC %)	15-20	30-85	
Propiedades físicas			
Densidad (kg/m ³)	6400-6500	7100-8000	7200-7500
Temperatura de fusión (°C)	1250 - 1300	950-1050	1350
Calor específico (J/kg°C)	450 - 520	390-440	550
Calor latente (KJ/kg)	12 - 28	4-7	
Conductividad térmica (W/m°C)	18 (β)	30-120 (β)	8,5(β)
	8,6-10 (M)		
Coefficiente térmico de expansión (10 ⁻⁶ 1/°C)	6,6-11	17	17
Resistencia eléctrica (Ohm m* 10 ⁻⁶)	0.5 – 1.1	0.07 – 0.14	1.0 – 1.3
Propiedades mecánicas			
Módulo de Young austenita (Gpa)	65-75	70-100	140-200
Coefficiente de Poisson	0.34	0.34	0.36
UTS (recocido) (Mpa)	900	400	
UTS (trabajado en frio) (Mpa)	1900	500-900	700-1000
Elongación a la fractura (trabajo en frio) (%)	15 - 25	8 - 15	16 - 30
Resistencia a la fatiga N=10 ⁶ (Mpa)	350	270 - 350	
Tamaño de grano (m x 10 ⁶)	1 - 100	25 - 150	
Otros			
Resistencia a la corrosión	excelente	buena	
Compatibilidad biológica	excelente	mala	
Fusión , colada y control de composición	difícil	razonable	
Trabajo en frio	razonable	razonable	
Maquinabilidad	difícil	buena	buena

3.2 Materiales porosos

El estudio de la estructura de los materiales sumado el avance tecnológico está permitiendo el desarrollo de materiales y equipos con cada vez más altas prestaciones tecnológicas. Los materiales porosos son la combinación de gases y material base, donde los gases ocupan variados porcentajes de volumen en la estructura total. De los materiales porosos se consiguen densidades muy bajas con características distintas al material de las que son formadas.

Las espumas metálicas son un caso particular de los sólidos celulares, cuerpos solidos con gases dispersos en su interior, el termino espuma por lo general está referido a burbujas de gas en un líquido, si esas burbujas pueden mantenerse luego de la solidificación del metal se obtiene una espuma sólida.

3.2.1 Sólidos celulares y espumas metálicas

Puede definirse un sólido celular como aquel formado por una red de células poliédrica unida entre sí formando mallas tridimensionales. Estos materiales son elevadamente porosos lo que se refleja en su densidad relativa ($\bar{\rho}$), definida como ρ'/ρ_M donde ρ' es la densidad de material celular considerando su porcentaje de porosidad y ρ_M equivale a la densidad del material de forma maciza. La Figura 12 muestra la diferencia entre un sólido celular y un sólido poroso [8].

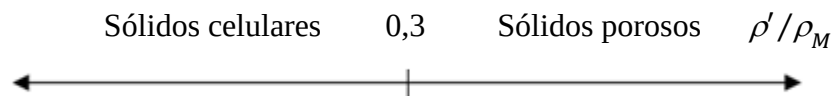


Figura 12: Diferencia esquemática entre un sólido celular y un material poroso.

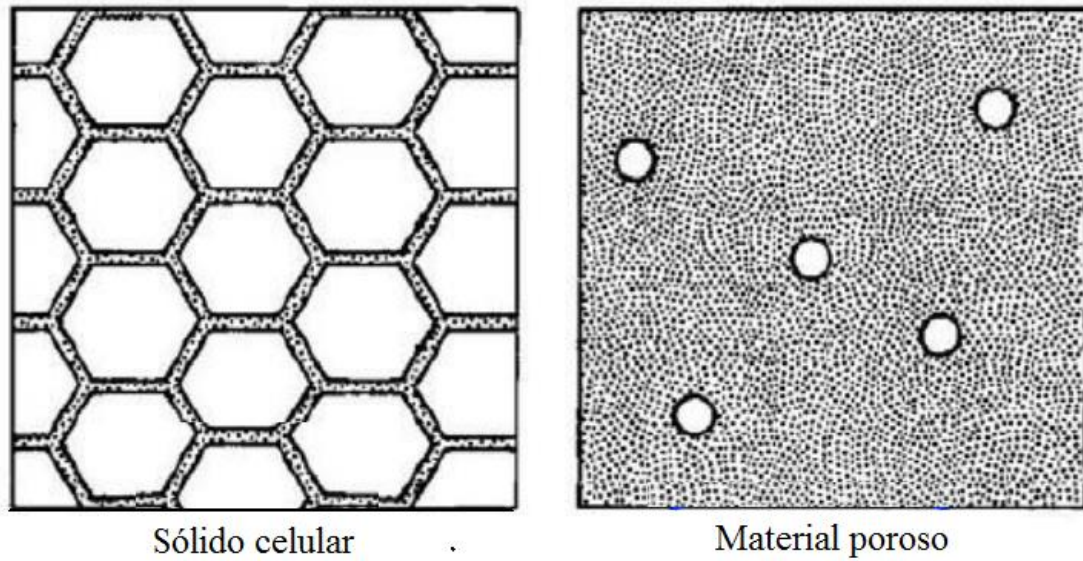


Figura 13: Diferencia entre un sólido celular y un material poroso. [9]

Los sólidos celulares y espumas metálicas tienen una estructura que se clasifica en celdas abiertas o cerradas, las primeras se identifican cuando el material se encuentra contenido en el borde de las celdas como se ve en la Figura 14, por otro lado las de celdas cerradas el material se encuentra contenido en los bordes como en las caras laterales de las celdas, aislando cada una de estas de las demás, ver Figura 15.

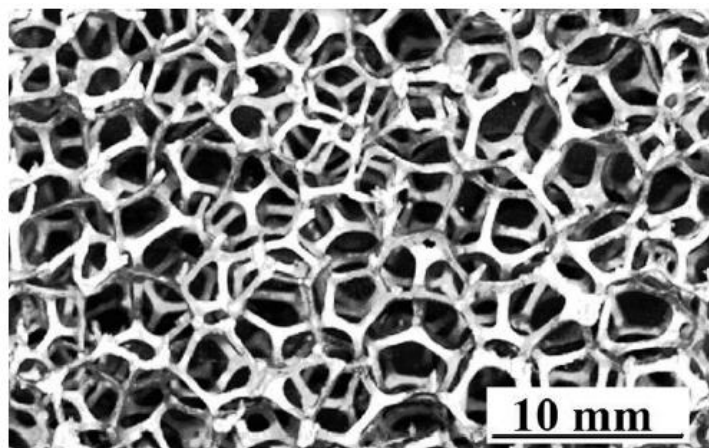


Figura 14: Espuma de aluminio de poros abiertos. [10]

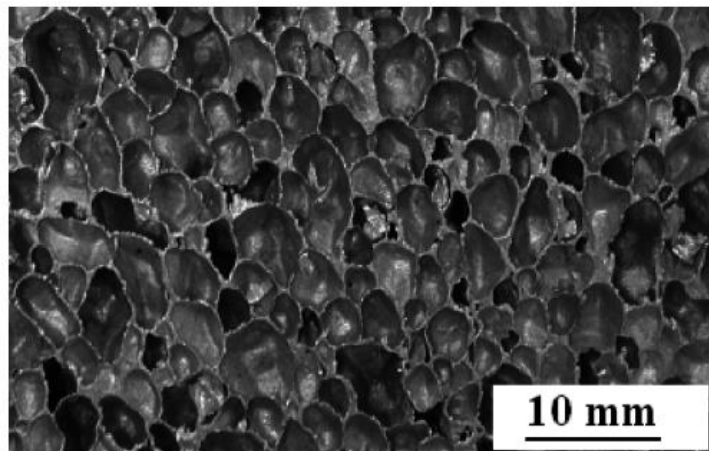


Figura 15: Espuma de aluminio de poros cerrados. [10]

Los sólidos celulares se pueden clasificar en naturales y artificiales, en los primeros se encuentran como ejemplo la madera, corcho, esponja, hueso. En los artificiales se encuentran las espumas metálicas, polietileno, pan y otros comestibles.

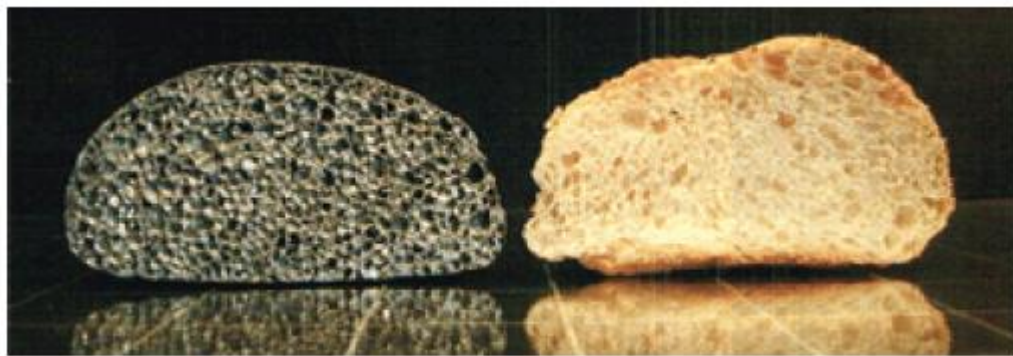


Figura 16: Comparación entre una espuma de Zinc y un trozo de pan.

3.2.2 Homogenización

En la rama de la mecánica de sólidos una característica fundamental es la predicción del comportamiento de los materiales, esto significa estimar las propiedades eficaces de la composición, es decir, estimar el estado de carga local en un punto dentro de un campo individual finito, a partir de una carga total y condiciones de borde, esto es conocido como homogenización [11].

La gran mayoría de los materiales industriales no son homogéneos, es decir, se constituyen de diferentes componentes de elementos que se distinguen en varias escalas de longitud, ejemplos típicos son: materiales compuestos, hormigón, materiales porosos, madera, hueso, etc. Uno de los objetivos importantes de los estudios teóricos de materiales con muchas fases está en la homogenización, es decir, en la simplificación de su comportamiento en general, en los que destacan su rigidez, propiedades de expansión térmica, resistencia, conducción de calor, propiedades eléctricas y electromagnéticas, entre otras, a partir del comportamiento de sus componentes y la interacción entre ellos sumado la disposición geométrica entre las fases.

En una escala micra todos los materiales son heterogéneos, a nivel molecular o atómico todos los materiales son constituidos por diferentes elementos, si los materiales de ingeniería se caracterizan a estos niveles de observación los modelos son muy dificultosos. Para simplificar este problema se introduce la hipótesis de continuidad de un material, esta noción implica un promedio estadístico de las propiedades reales del material idealizándolo a un elemento continuo, una vez aceptado este modelo se deduce el concepto de homogenización que se caracteriza en que todas las propiedades de un material son idénticas en todos sus puntos.

Se definen tres escalas para representar de mejor manera los elementos a estudiar. La Macro-escala en donde se representa el total del material, la Micro-escala que es un zoom de la Macro-escala en donde se aprecia la heterogeneidad en la estructura de los materiales en detalle, como punto medio entre estas dos escalas se encuentra la Meso-escala la que permite resumir la no homogeneidad del material en unidades prácticas [12].

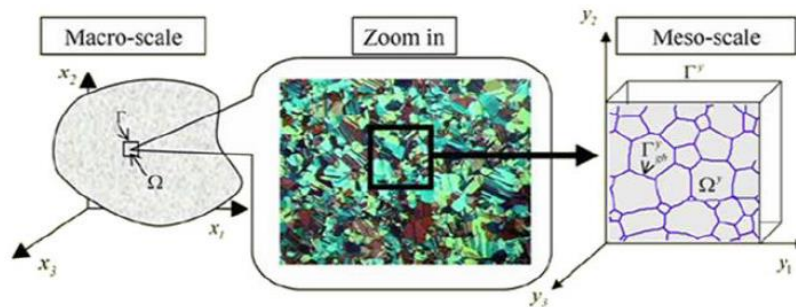


Figura 17: Escala de homogenización.

3.2.3 Aplicaciones

Las espumas metálicas tienen una combinación de propiedades que las hacen atractivas para aplicaciones ingenieriles, como por ejemplo el uso de materiales livianos para la construcción, control térmico, acústico, adsorber energía por deformación, entre otras.

- Estructuras livianas

Su excelente relación masa/rigidez las hacen atractivas para la construcción de estructuras livianas, los paneles de sándwich con núcleo de espuma metálica tienen características para ser usadas en aviones, embarcaciones, etc.

- Intercambiadores de calor

Las espumas de celda abierta tienen mucha área superficial y alta conductividad térmica, lo que otorga cualidades excepcionales para transferir energía en dispositivos como intercambiadores de calor.

- Absorber energía mecánica y amortiguamiento.

La capacidad de absorber energía mecánica en las espumas metálicas es mayor que los metales sólidos, se usan para rellenos de perfiles huecos en amortiguamiento de impactos.

Para el caso en que la frecuencia de excitación es mayor a la frecuencia natural del sistema, implica que la máquina atravesara por un estado de resonancia tanto al partir como al detenerse, por lo que una adecuada amortiguación es de interés para evitar grandes esfuerzos.



Figura 18: Prototipo de soporte de motor con núcleo de espuma metálica.

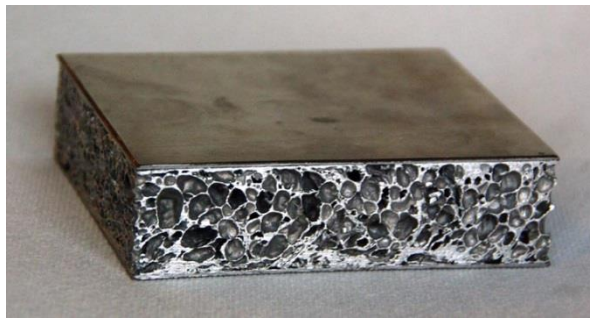


Figura 19: Compuesto de acero tipo sándwich con núcleo de espuma metálica.

3.3 Vibraciones Mecánicas

Las vibraciones constituyen un área de constante estudio, en el presente trabajo se estudia la respuestas de un material SMA sobre una excitación armónica sinusoidal. A continuación se describen los modelos bajo vibración, sus variables y las expresiones que relacionan el amortiguamiento para los diferentes tipos de materiales ingenieriles.

3.3.1 Respuesta a una excitación armónica sin amortiguamiento

Existen diferentes formas de modelar una excitación armónica, se define la expresión de excitación en función del tiempo $F(t)$ en la forma:

$$F(t) = F_0 \text{sen}(\omega t), \quad (2)$$

donde F_0 representa la amplitud de la fuerza, ω es la frecuencia angular o frecuencia de excitación y tiene unidades de rad/s. El modelo que define la situación se representa en la Figura 20.

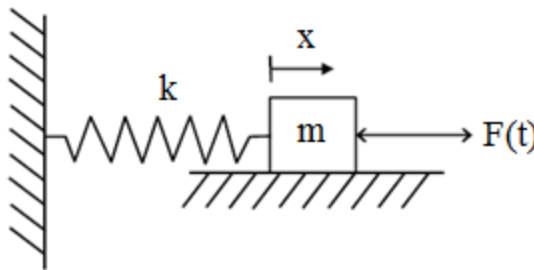


Figura 20: Sistema masa resorte con excitación armónica.

A partir de la Figura 20 se expresa la ecuación diferencial del movimiento en el sistema como:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = F_0 \text{sen}(\omega t), \quad (3)$$

donde m es la masa y k la constante de rigidez del resorte. Dividendo la ecuación (3) por m y definiendo $\omega_n = \sqrt{k/m}$, $f_0 = F_0/m$ la ecuación diferencial como:

$$\ddot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = f_0 \text{sen}(\omega t), \quad (4)$$

donde ω_n se conoce como frecuencia natural. De la ecuación diferencial (4) se tiene que su solución homogénea ($f_0 = 0$) y particular:

$$x(t)_h = A \text{sen}(\omega_n t) + B \cos(\omega_n t), \quad (5)$$

$$x(t)_p = \frac{F_0}{k} \text{sen}(\omega t), \quad (6)$$

En las ecuaciones (5) y (6) se tiene que A y B son constantes de condiciones iniciales (x_0, v_0) y X_0 es la amplitud de la respuesta particular. Considerando las condiciones iniciales igual a cero, reemplazando la amplitud en la solución particular y se sabe que $x(t) = x(t)_h + x(t)_p$, la solución completa:

$$x(t) = \frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2} (\text{sen } \omega t - \text{sen } \omega_n t), \quad (7)$$

De la expresión (7) se deduce que cuando $\omega_n = \omega$ la ecuación no es válida y se indefine, por el contrario cuando la frecuencia de excitación (ω) es cercana a (ω_n) la amplitud de la respuesta crece mucho, este suceso se conoce como resonancia, la amplitud de la respuesta crece sin restricciones como se muestra en la Figura 21, respuesta no amortiguada a una excitación armónica.

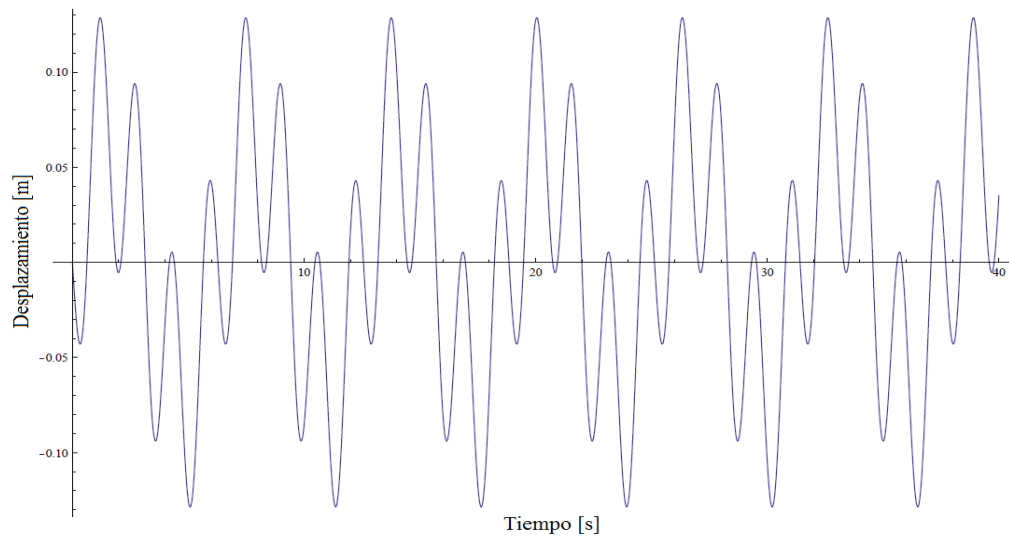


Figura 21: Respuesta a una excitación no amortiguada con $f_0 = 1$, $\omega_n = 1 \text{ rad/s}$, $\omega = 4 \text{ rad/s}$.

3.3.2 Modelos de vibración con amortiguamiento

El amortiguamiento es la capacidad que poseen los materiales y/o componentes de disipar energía. El amortiguamiento puede ser viscoso, es decir, que depende de la velocidad (AV), por histéresis (AH) que es dependiente del desplazamiento y la deformación de un material, y por roce seco debido a la fricción entre los elementos.

El amortiguamiento viscoso se asume como supuesto principalmente por conveniencia matemática, este modelo es aproximadamente válido principalmente para amortiguaciones por medio de fluidos, por el contrario la amortiguación a través material (estructura de acero, polímero, aleaciones) es por medio de su fricción interna que se conoce como ciclo de histéresis.

La diferencia principal entre estos dos modelos es que en el amortiguamiento viscoso, la energía de disipación depende linealmente de la frecuencia de oscilación, por el contrario en el amortiguamiento por histéresis es independiente de la frecuencia [13].

Las expresiones que definen la amortiguación se basan en estos dos modelos, la Figura 22 ilustra cada modelo en un grado de libertad.

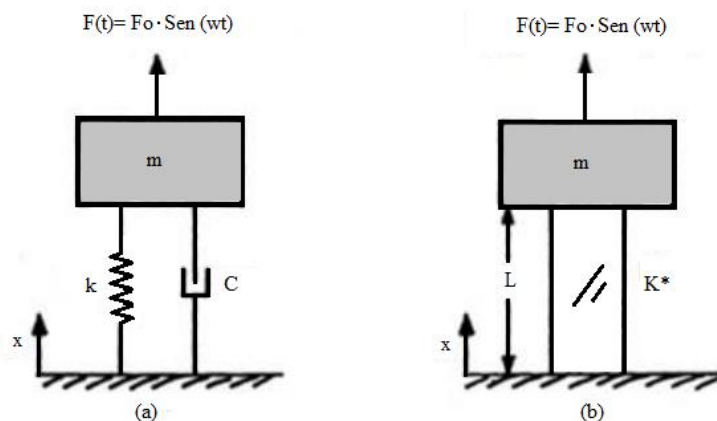


Figura 22: (a) modelo de amortiguamiento viscoso (AV) (b) modelo de amortiguación por histéresis (AH).

La ecuación que representa el movimiento en función del desplazamiento en un modelo AV (Fig. 22 (a)):

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_0 \text{sen}(\omega t), \quad (8)$$

donde m es la masa, k es la constante elástica y c es el coeficiente de amortiguación. En el modelo AV el resorte es un elemento elástico que entrega una restauración puramente elástica, el amortiguador proporciona la amortiguación viscosa, debido a que el resorte y el amortiguador se posicionan en paralelo, el comportamiento elástico se produce en la carga y descarga, el trabajo cíclico que se produce genera que el amortiguador absorba una parte de esa energía dando lugar así a la amortiguación.

En el caso del modelo AH la ecuación que representa el fenómeno (Fig. 22 (b)):

$$m\ddot{x}(t) + k^*x(t) = F_0 \text{sen}(\omega t), \quad (9)$$

donde:

$$k^* = k_1 + k_2 i, \quad i = \sqrt{-1} \quad (10)$$

En la expresión 9 para un sistema AH, k^* equivale al módulo complejo donde k_1 es el constante elástica y k_2 es la constate de pérdida y se relaciona con la histéresis del material [14].

La solución de la ecuación diferencial para ambos casos se expresa en la ecuación 11 en su parte transiente y estacionaria [15], con $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$, $\zeta = c/c_c$, $c_c = 2\sqrt{km}$:

$$x(t) = Ae^{-\frac{\omega_n^2 \tan \phi t}{2\omega}} \text{sen}(\omega_d t + \alpha) + X_0 \text{sen}(\omega t - \theta), \quad (11)$$

Para un desplazamiento y velocidad inicial x_0 y v_0 , se tiene que para la parte transiente de la ecuación total:

$$A = \frac{x_0 - X \cos \theta}{\sin \theta}, \quad (12)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\omega(x_0 - X \cos \theta)}{v_0 + (x_0 - X \cos \theta) \frac{\omega_n^2 \tan \phi}{2\omega} - \omega X \sin \theta} \right), \quad (13)$$

La solución estacionaria es de la forma:

$$x(t) = X_0 \sin(\omega t - \theta), \quad (14)$$

donde:

$$X_0 = \frac{F_0/k}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \tan^2 \phi}}, \quad (15)$$

$$\tan \theta = \frac{\tan \phi}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}, \quad (16)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{frecuencia natural} \quad (17)$$

De las ecuaciones los parámetros significativos para los dos modelos: [14]

$$\tan \phi = \frac{k_2}{k_1}, \quad \text{para el modelo AH} \quad (18)$$

$$\tan \phi = 2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}, \quad \text{para el modelo AV} \quad (19)$$

Las ecuaciones 18 y 19 son la solución en cada modelo con sus respectivas variables, el término ζ en la ecuación 19 es la razón de amortiguamiento en el modelo AV ($\zeta = c/c_c$ donde c_c es el valor crítico de amortiguamiento $c_c = 2\sqrt{km}$).

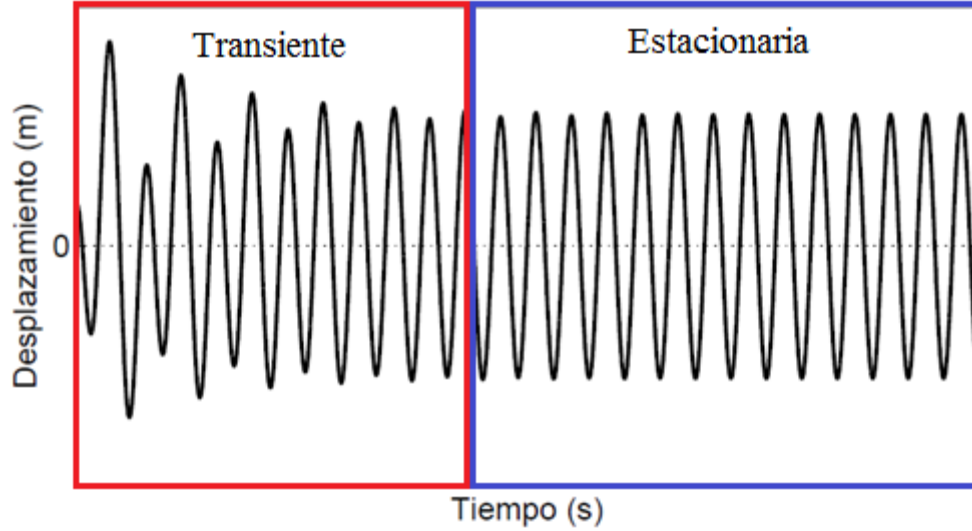


Figura 23: Representación gráfica de una vibración con amortiguamiento, la sección en rojo de la gráfica representa la parte transiente y la azul su parte estacionaria en el tiempo [15].

3.3.3 Coeficiente específico de amortiguamiento y factor de pérdida

Con las ecuaciones y expresiones se definen los coeficientes que entregan la información para cada material en su capacidad de amortiguación.

El coeficiente específico de amortiguamiento SDC (Specific Damping Capacity) se define por la expresión:

$$SDC = \frac{\Delta W}{W} , \quad (20)$$

donde ΔW representa la energía absorbida por el amortiguador en cada ciclo de trabajo y W es la energía total entregada o también llamada energía de amortiguación absoluta, por lo tanto el SDC es una medida de amortiguación relativa. [14]

El factor de pérdida η (loss factor) se define por la expresión:

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} , \quad (21)$$

Si la energía fuera disipada de forma uniforme en cada ciclo de vibración el factor de pérdida se define como la energía disipada en cada radián del ciclo. El factor de pérdida es el índice más general en medición de la capacidad de amortiguación de un material, puede ser usado en pruebas de materiales o en el comportamiento de una estructura compuesta [14].

Estos dos coeficientes son importantes a la hora de evaluar un material por su capacidad de absorber energía en una vibración.

La Tabla 2 resume las definiciones de cada expresión señalada. Dicha tabla indica las conversiones en las expresiones de capacidad de amortiguación con los modelos de vibración viscoso (AV) y modelo de vibración por histéresis (AH).

Tabla 2 : Definiciones de amortiguamiento. [14]

Expresiones	Definición
Tangente de desfase: $\tan\phi = \frac{k_2}{k_1} \quad \text{modelo AH}$ $\tan\phi = \frac{c\omega}{k} = 2\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \quad \text{modelo AV}$	$0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$ k_1 : modulo elástico k_2 : modulo elástico de pérdida c: coeficiente de amortiguamiento k: modulo elástico de rigidez ω : frecuencia de excitación ζ: razón de amortiguamiento ω_n : frecuencia natural
Coeficiente específico de amortiguamiento: $SDC = \frac{\Delta W}{W}$	ΔW: Energía de disipación por ciclo de oscilación armónica. W: cantidad que representa la energía de almacenamiento durante la oscilación
Factor de pérdida : $\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W}$	$\Delta W, W$: definidos anteriormente.

Tabla 3: Conversiones exactas de amortiguamiento. [14]

Conversiones exactas	Observaciones
$SDC = \frac{\Delta W}{W} = 2\pi \tan\phi$, para los modelos AH y VA	$0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$
$\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} = \tan\phi$, para los modelos AH y VA	$0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$

3.3.4 Aislamiento de vibraciones.

El aislamiento de vibraciones tiene por objetivo aislar la máquina de excitaciones exteriores, o reducir las vibraciones que la misma máquina genera en su entorno.

Se define una máquina que genera una fuerza de la forma $f = F_0/m \sin(\omega t)$ y se necesita que los efectos transmitidos hacia otras máquinas sean mínimos, por lo tanto, se define f_b como la fuerza que aplica la máquina sobre la fundación que la contiene.

$$f_b = kx_r + c\dot{x}_r , \quad (22)$$

donde x_r es el movimiento relativo entre la base y la máquina, por lo tanto, la fuerza transmitida f_b sobre la fundación es :

$$f_b = f_0 \sqrt{\frac{1 + \left[2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}{\underbrace{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}_{Tr}}} , \quad (23)$$

donde Tr es la razón de transmisión de la fuerza generada por la máquina hacia la base o fundación.

En la ecuación 23, mientras mayor sea ω/ω_n menor es la fuerza transmitida, esto implica que se busca minimizar la frecuencia natural con elementos elásticos con menor rigidez, la limitante aparece debido que al tener baja rigidez se pueden tener deflexiones elevadas. [15]

Una alternativa de estudio es usar los materiales SMA por sus características elásticas con módulos de rigidez superiores a por ejemplo gomas. Ver Figura 30.

3.3.5 Control de vibraciones

En el diseño de un componente vibracional, se debe considerar claramente cuál es la respuesta deseada, que puede estar en términos de su desplazamiento, velocidad o aceleración, estas variables se analizan de acuerdo a la aplicación que tendrá el elemento. Se han propuesto diferentes métodos para medir las vibraciones, estos estándares están medidos por su valor rms (*root mean square*) que corresponde a la raíz cuadrada del promedio temporal de la señal al cuadrado, Para un desplazamiento $x(t)$ el termino rms se expresa en la ecuación 24. [16]

$$x_{rms} = \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \right]^{1/2}, \quad (24)$$

donde T es el periodo de vibración en términos de tiempo.

La Tabla 4 muestra los rangos típicos usuales de amplitud de desplazamientos y frecuencias en vibraciones.

Tabla 4: Rango de amplitudes y frecuencias en vibraciones. [16]

	Frecuencia [Hz]	Amplitud de desplazamiento [mm]
Vibración Atómica	10^{12}	10^{-7}
Límites de percepción humana	1 - 8	10^{-2}
Vibración de máquinas y edificios	10 - 100	10^{-2} - 1
Vaivén de edificios altos	1 - 5	10 - 1000

La forma habitual de describir los niveles de vibraciones es por medio de gráficos que relacionan las diferentes variables que importan en este tipo de análisis, la Figura 24 es una representación entre la relación de desplazamiento, velocidad, aceleración y frecuencia para un sistema de un grado de libertad sin amortiguamiento.

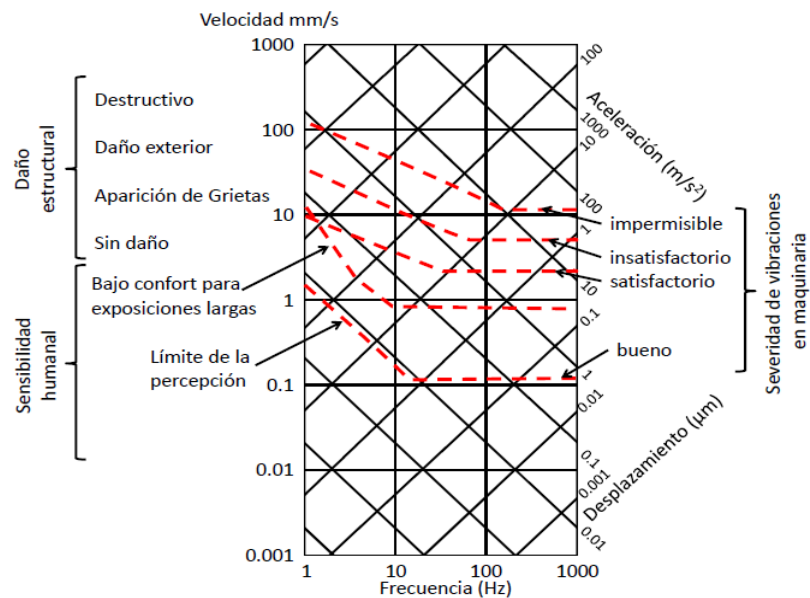


Figura 24: Niveles de vibración permisibles RMS [16].

Los sistemas de control de vibraciones se pueden dividir en dos grandes grupos: los sistemas activos y los pasivos [17].

Los sistemas activos registran la respuesta estructural y en forma inmediata aplican fuerzas contrarias al movimiento por medio de un procesador de señal y un actuador, por lo tanto necesitan energía externa para su funcionamiento, una desventaja al momento de controlar una excitación. Los sistemas pasivos funcionan usando la energía de la carga excitadora por medio de un elemento disipador de energía que aporta un amortiguamiento, entre los que se encuentran los viscosos y los del tipo histeréticos estudiados en este trabajo.

La Figura 25 detalla una parte de los distintos tipos de controles de vibración.

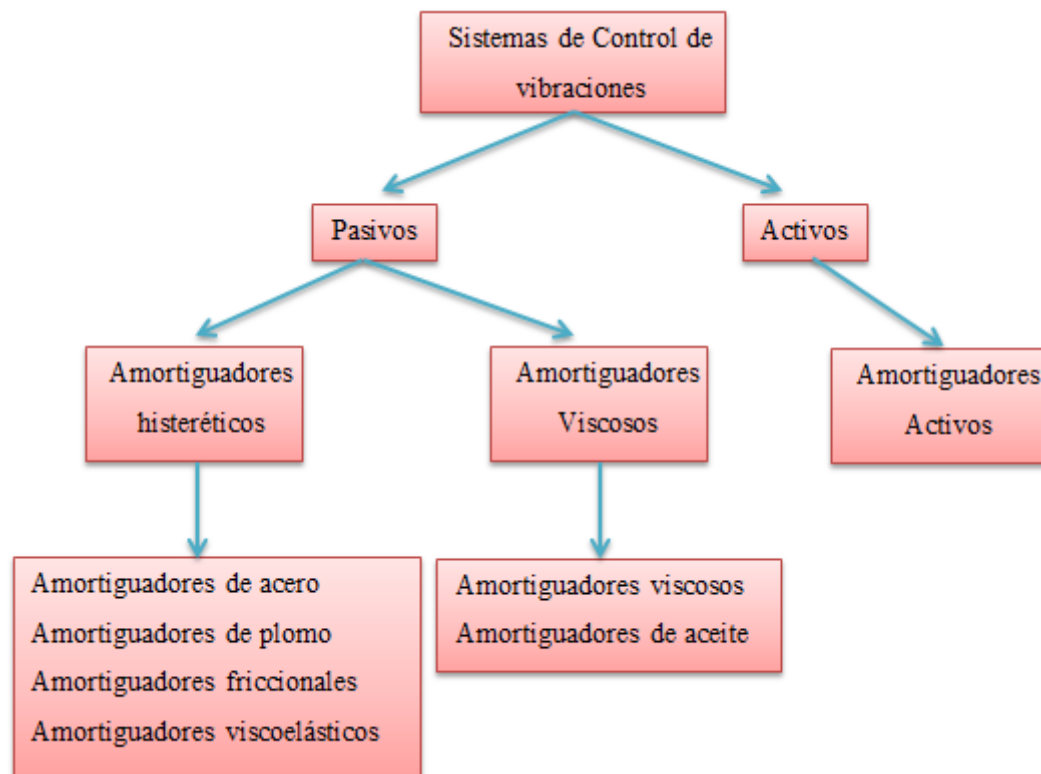


Figura 25: Tipos de control de vibraciones.

De acuerdo al esquema anterior el control de las vibraciones mecánicas se basan en materiales con amortiguamiento, todos los sistemas mecánicos reales poseen amortiguamiento en mayor o menor medida.

Si un sistema mecánico se encuentra bajo fuerzas externas que cambian en el tiempo, las amplitudes aumentan en cercanías de su resonancia, la presencia de amortiguamiento siempre limita la amplitud de las vibraciones. Si las fuerzas de excitación son de frecuencias conocidas será posible evitar la resonancia cambiando la frecuencia natural del sistema y alejándola de aquella condición. Por el contrario si el sistema debe operar en un rango de frecuencias como el caso de un motor eléctrico de velocidad variables o un motor a combustión, no es muy posible evitar la resonancia en su rango de condiciones de trabajo, en estos últimos casos se puede tratar la situación aportando amortiguamiento al sistema con el objetivo de controlar su respuesta dinámica mediante la introducción de fluidos tales como agua, aceite, etc, que aíslen el sistema aportando amortiguamiento externo, o el uso de materiales estructurales con alto amortiguamiento interno ejemplos como hierro fundido, materiales tipo sándwich o el uso materiales con memoria de forma es la idea de este estudio.

A modo de ejemplo, en aplicaciones de tipo estructural, es posible introducir amortiguación por medio de uniones atornilladas o remachadas, éstas permiten un roce seco entre las superficies, disipando más energía en comparación con las uniones soldadas. Por lo tanto, a la hora de aumentar la capacidad de disipación de energía en una estructura es considerable las uniones remachadas o atornilladas, sin embargo, estas reducen la rigidez del sistema y generan problemas de fatiga y al largo plazo fallan.

3.3.6 Amortiguamiento en aleaciones con memoria de forma

En los capítulos anteriores se presentan las características más relevantes de las aleaciones con memoria de forma. La transformación de fase austenita martensita y viceversa, el efecto de memoria de forma y la superelasticidad.

El efecto de superelasticidad es usado en este trabajo, se busca estudiar y proponer una alternativa para el aprovechamiento de los SMA, sus características de superelasticidad y buena rigidez, para el uso en dispositivos con capacidad de amortiguamiento de vibraciones.

Como se menciona en el apartado anterior, el efecto de superelasticidad se produce por una transformación martensítica inducida por tensiones. Durante la carga del material se produce la transformación de austenita a martensita y este se deforma, esta transformación se revierte al retirar la carga, lo que conlleva a que el material vuelva a su fase inicial de austenita. La combinación de estos dos procesos da lugar a un ciclo cerrado de histéresis. En el diagrama de tensión – deformación de la Figura 27 se muestra el ciclo detallado. Las deformaciones unitarias en este tipo de aleaciones SMA pueden llegar al 10 %.

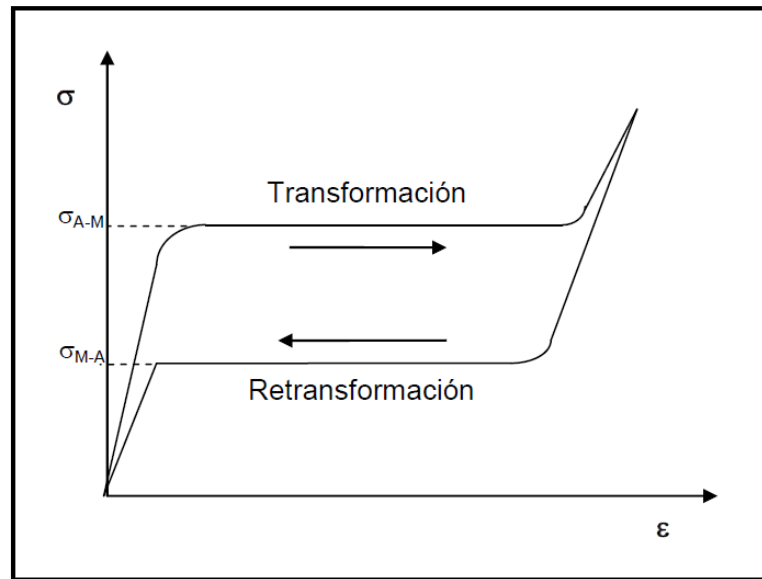


Figura 26: Ciclo de histéresis ideal de una material SMA

El ciclo de histéresis de un material es un indicador de que no toda la energía que se emplea para deformar el material es recuperada al momento de volver a sus dimensiones originales. Al cargar y descargar el elemento, parte de la energía empleada es absorbida y disipada al exterior por medio del material, este es el principio de amortiguamiento por histéresis.

En la Figura 27 muestra que para generar una deformación en el material para llegar al punto A, se debe aplicar una energía que es representada por el área bajo la curva W.

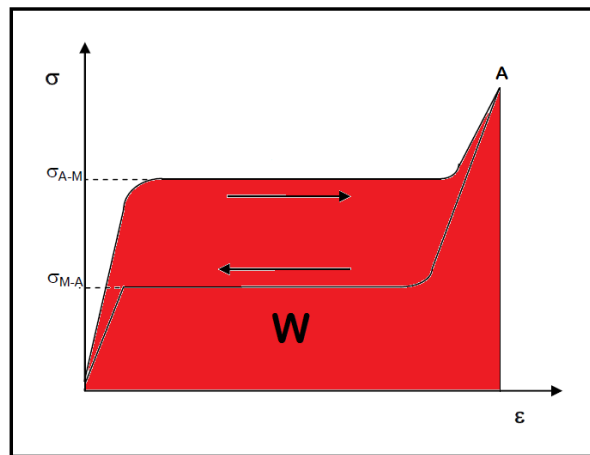


Figura 27: Representación de la energía total aplicada a un material SMA.

En la Figura 28 el área de la curva de retransformación o transformación inversa, que equivale a la descarga de las tensiones sobre el material, genera una curva menor a la que se produce para llegar al punto A, esta energía W^* es menor a la que se usó para llegar al punto A.

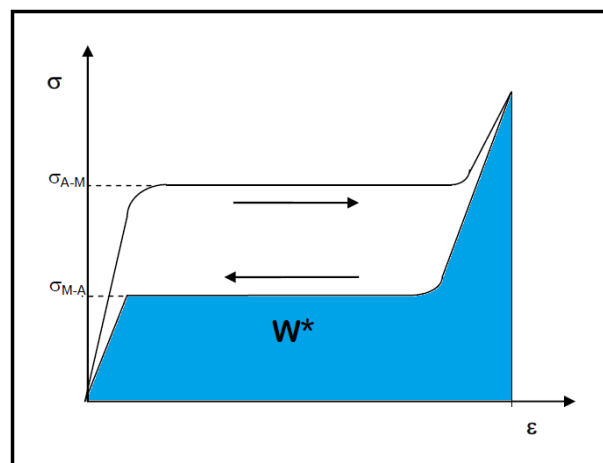


Figura 28: Energía de descarga de tensiones o transformación inversa de un SMA.

La diferencia entre la energía total W y la energía que se devuelve en la descarga W^* , equivale a la energía disipada por el material en cada ciclo. En la Figura 29 se representa el ciclo de histéresis en un gráfico esfuerzo- deformación

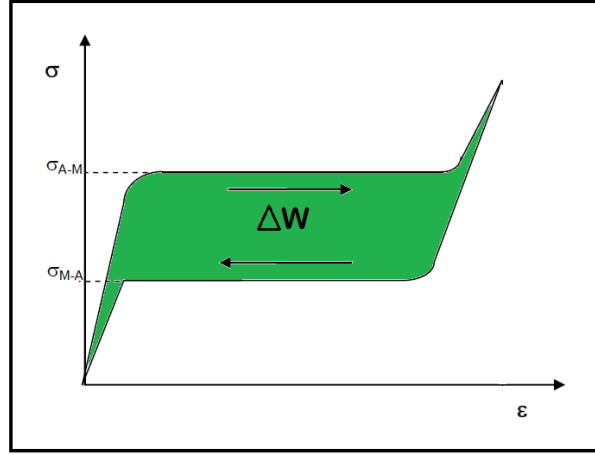


Figura 29: Energía disipada por el ciclo de histéresis ideal en un material SMA.

Para caracterizar las propiedades de amortiguación de las aleaciones con memoria de forma se usa el coeficiente específico de amortiguamiento (ecuación 25) y el factor de pérdida η (ecuación 26)

$$SDC = \frac{\Delta W}{W} = \frac{W - W^*}{W} , \quad (25)$$

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{2\pi} \frac{W - W^*}{W} , \quad (26)$$

Para comparar la capacidad de amortiguamiento de distintos materiales se representa la gráfica de la Figura 30. Esta elaborada para las distintas familias de materiales, se puede apreciar que los SMA tienen valores superiores de SDC para diferentes aleaciones de metales. Por otro lado, se aprecia que las espumas y elastómeros tienen un mayor SDC con respecto a los SMA, pero estos últimos tienen la ventaja de tener un módulo de Young muy superior, esta característica es muy importante por las ventajas que genera en el diseño de elementos.

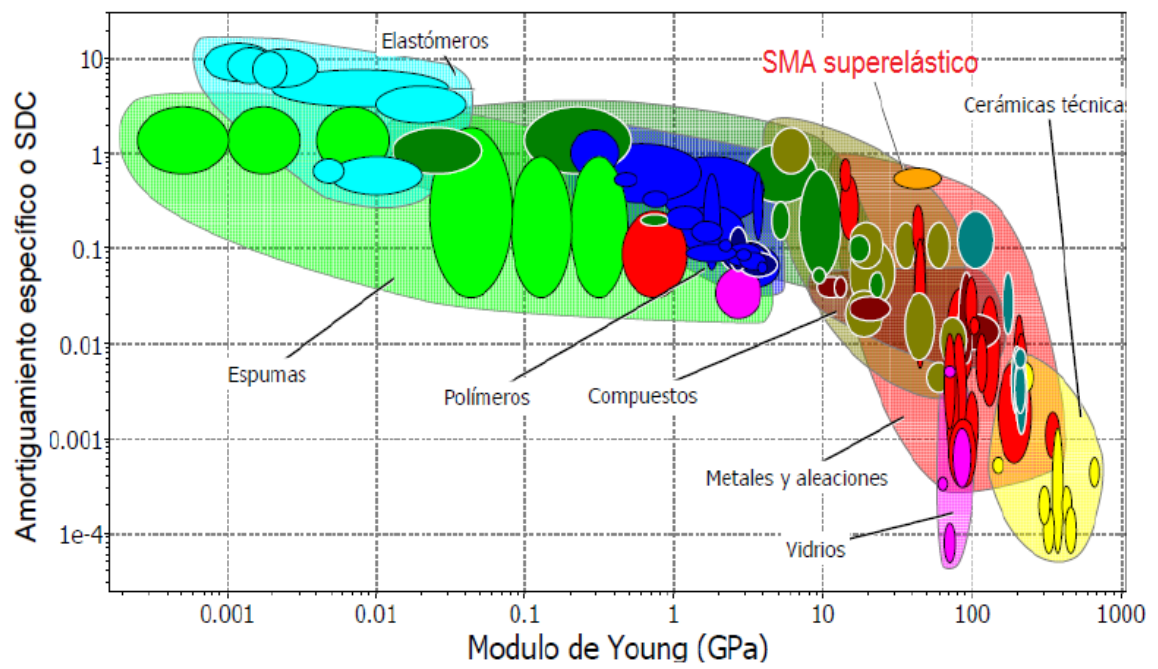


Figura 30: Carta de comparación de SDC para diferentes familias de materiales. [18]

4 Estudio preliminar

Las aleaciones con memoria de forma presentan dos diferentes tipos de comportamiento al ser sometidos a cargas para diferentes temperaturas: el efecto superelástico y el efecto de memoria de forma. Para ambos casos el comportamiento se relaciona con una transformación de fase por desplazamiento denominado martensítica.

Por lo general, el tipo de aleación de los SMA afecta en sus capacidades de absorber energía, a su vez la modificación de factores externos como la temperatura a la cual trabajan, la frecuencia y amplitud de la carga aplicada, sumado a su estructura interna como el tamaño de grano y los defectos de la microestructura, son importantes variables internas que modifican sus propiedades.

Los SMA con base de Cobre y aluminio son de gran interés debido al tipo de material usado ampliamente en ingeniería, la Figura 31 se representa la clasificaciones de estas aleaciones, las más conocidas son: CuAlZn, CuAlNi, CuAlBe. Algunas aplicaciones de estas SMA con base de cobre son: válvulas de seguridad, fusibles de temperatura, elementos vibratorios estructurales para disminuir el efecto de los terremotos.

A las aleaciones CuAl se les agrega un tercer elemento para tener temperaturas de transformación adecuadas, los resultados de agregar pequeñas cantidades de Berilio a la aleación genera una disminución de la temperatura M_s (inicio fase martensita), esto es una ventaja a la hora de analizar el efecto del Berilio. En particular el CuAlBe es una aleación con propiedades superelásticas a temperaturas ambientes, este SMA es particularmente estudiado como potencial uso para la disipación de energía. Se ha observado que sus gráficos esfuerzo - deformación en cargas cíclicas para deformaciones en su rango superelástico, tienen ciclos de histéresis a los cuales se le asocia un gran amortiguamiento interno.

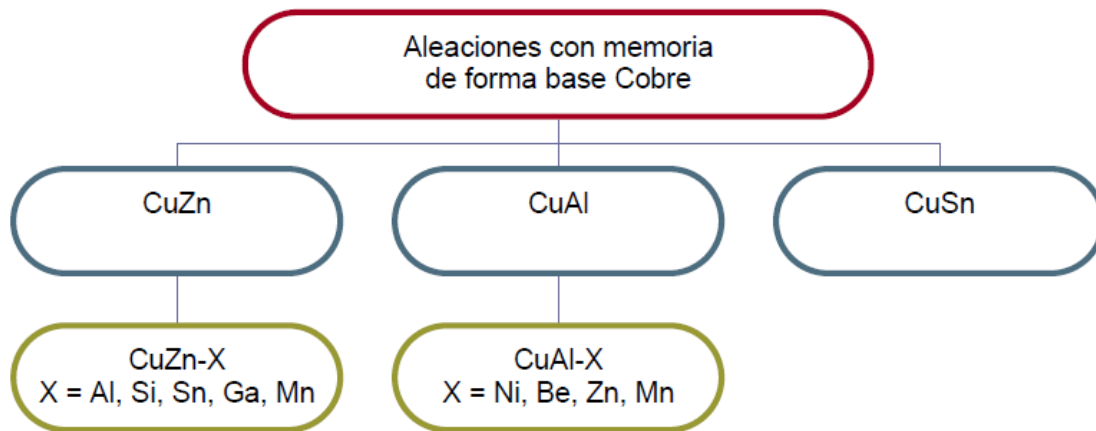


Figura 31: Clasificación de las aleaciones con memoria de forma con base de cobre.

4.1 Propiedades aleación CuAlBe

La aleación CuAlBe tiene una base de Cobre con Aluminio y una cantidad específica de Berilio necesaria para conseguir un comportamiento superelástico a temperatura ambiente.

Las estructuras metalográficas de la aleación CuAlBe en sus diferentes fases se muestran en la Figura 32 y 33. La Figura 32 se puede apreciar su fase austenita con tamaños de granos similares entre sí para una probeta cilíndrica de 3,4 mm de diámetro [19].

Por otro lado, en la Figura 33 se observa una estructura martensítica después de ser laminada y homogenizada.

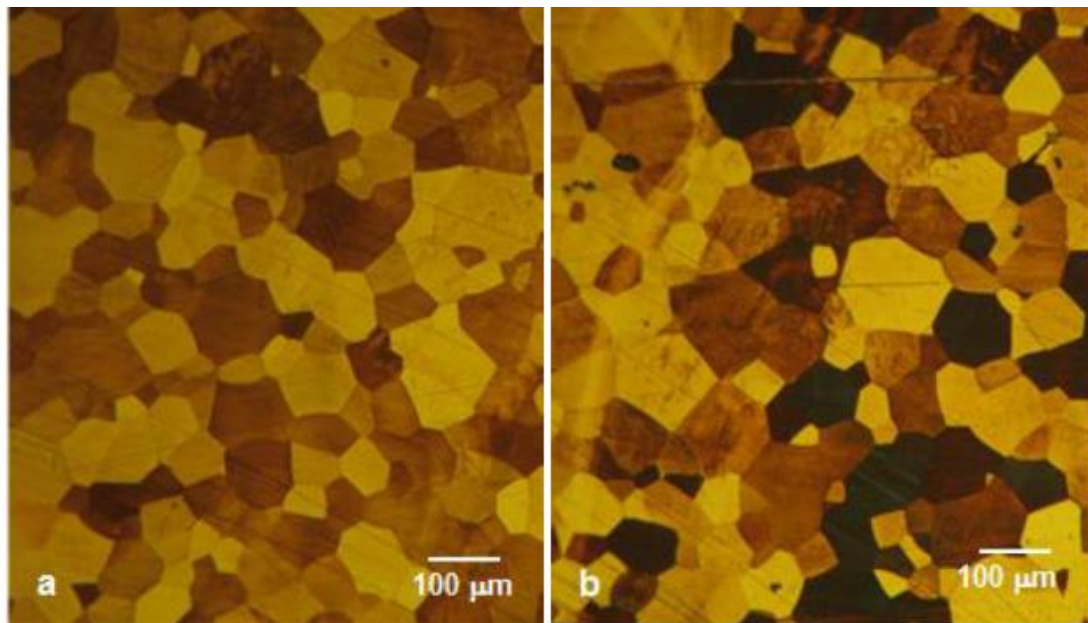


Figura 32: Microestructura de barra de material CuAlBe de 3,4 mm de diámetro. (a) Sección longitudinal, (b) Sección transversal [19].

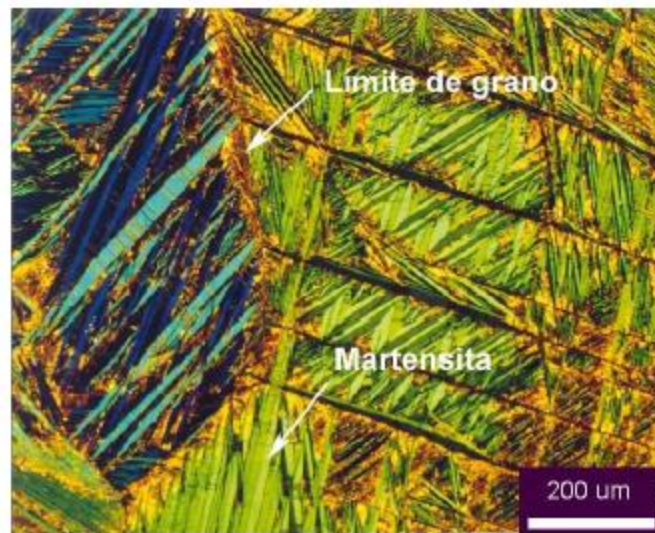


Figura 33: Microestructura en su fase martensítica de la aleación CuAlBe [20].

En la Figura 34 se muestran curvas de esfuerzo vs deformación de unas probetas de CuALBe sometidas a diferentes niveles de deformación $\varepsilon = 2,5\%$, $3,3\%$, $5,0\%$, $6,5\%$ y $9,0\%$. Además se incluyen las curvas de dos probetas llevadas a la fractura de las cuales se obtuvieron deformaciones $10,5\%$ y $10,7\%$.

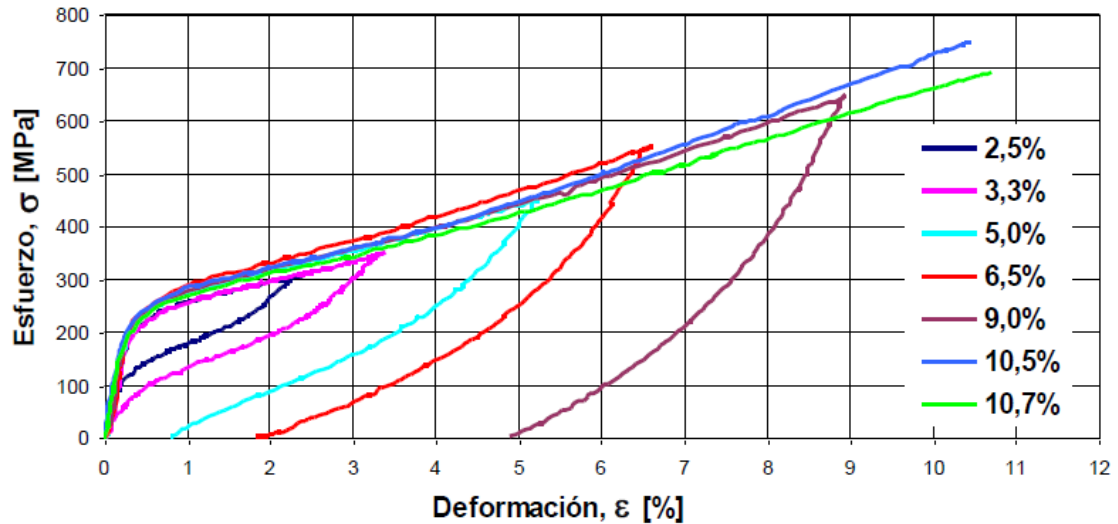


Figura 34: Curvas de tracción para diferentes niveles de deformaciones solicitadas

En la Figura 35 se observan las curvas con niveles de deformación de $2,5\%$ y $3,3\%$, en las cuales se obtienen esfuerzos máximos de 300 [Mpa] y 350 [Mpa] respectivamente. En ambos ensayos se aprecia un comportamiento inicialmente lineal, correspondiente a la zona elástica, luego sigue una etapa de elasticidad que corresponde a la transformación de austenita a martensita, al llegar a la deformación establecida la probeta se descarga, se observa que no se presentan deformaciones permanentes, este comportamiento se encuentra en la zona de superelasticidad.

En las Figuras 36 y 37 se aprecia los valores de módulo de Young austenítica $E(A)$, el valor de esfuerzo de inicio de transformación de austenita a martensita y el módulo de Young entre la austenita y martensita $E(d)$. Para ambos ensayos se observa que los

valores de $E(A)$, $E(d)$, y esfuerzo de inicio martensita, son similares como es de esperar.

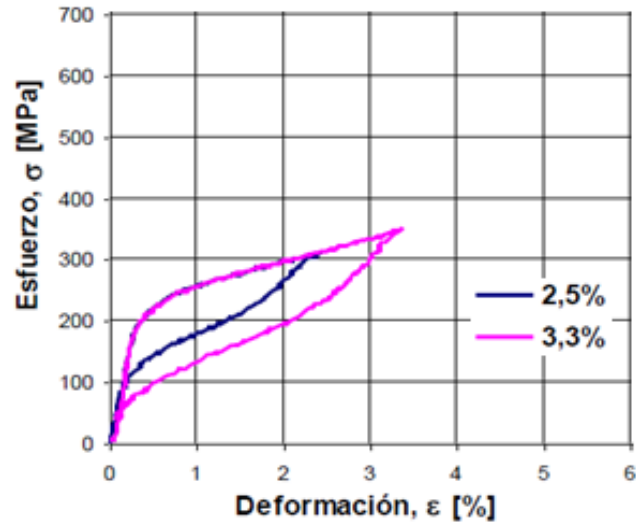


Figura 35: Curva esfuerzo- deformación a temperatura ambiente en aleación CuALBe, para deformaciones impuestas de 2,5% y 3,3%.

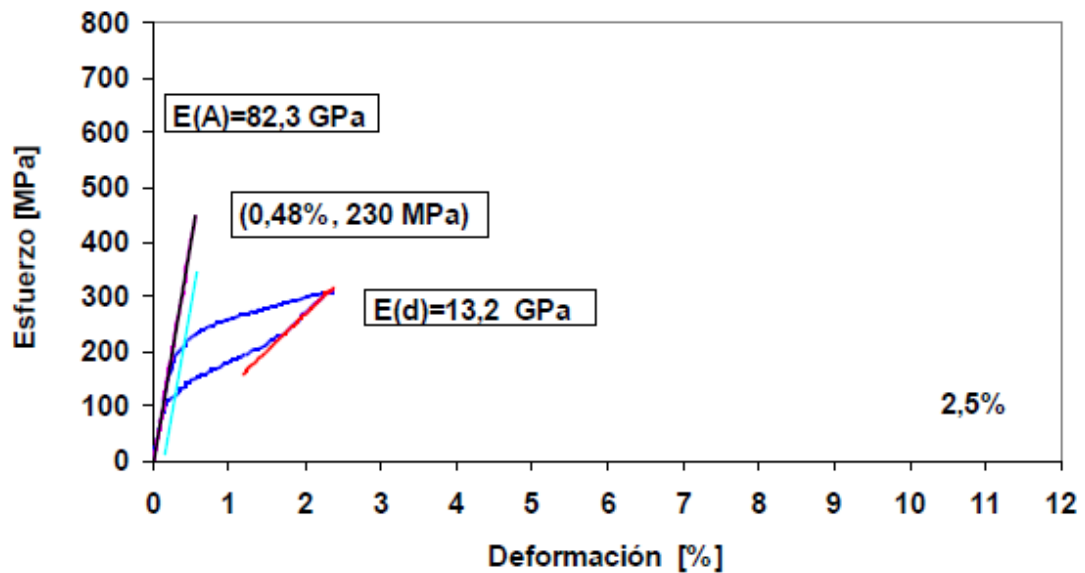


Figura 36: Determinación de módulos de Young ($E(A)$, $E(d)$) y el esfuerzo de inicio de martensita, ensayo con una deformación impuesta de 2,5%.

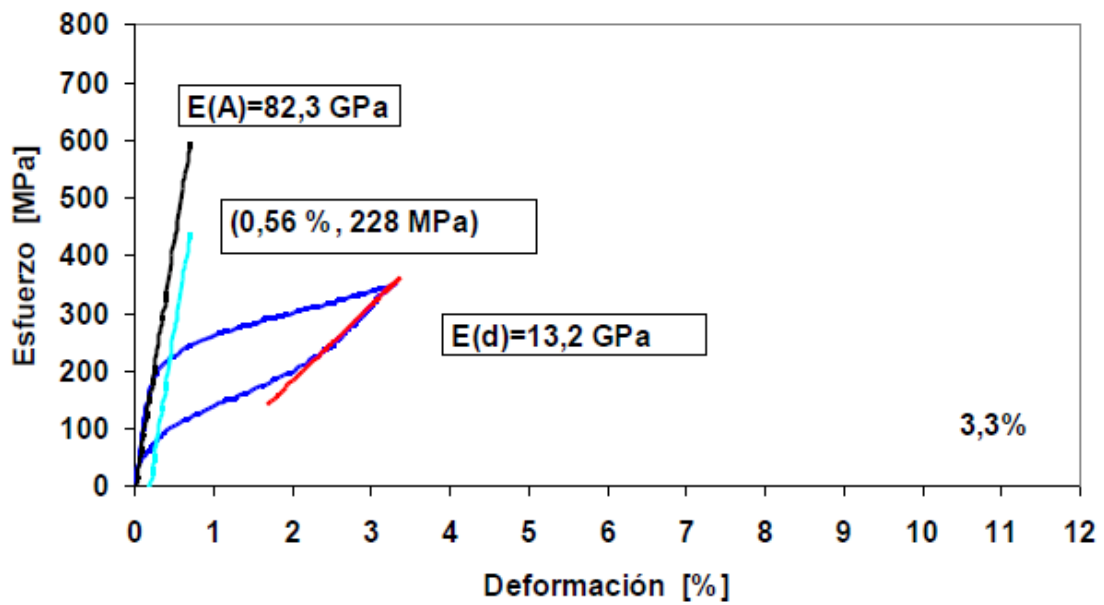


Figura 37: Determinación de módulos de Young ($E(A)$, $E(d)$) y el esfuerzo de inicio de martensita, ensayo con una deformación impuesta de 3,3%.

5 Metodología

La metodología utilizada en este trabajo consta de dos partes importantes. La Primera consiste en la selección de las geometrías a utilizar. La segunda es la definición de las propiedades físicas del material SMA. Para el desarrollo de los resultados se usa el método de elementos finitos como base para los cálculos y análisis.

5.1 Método de elementos finitos

El método de elementos finitos MEF es una técnica numérica que se basa en la discretización de un sistema continuo, un modelo, en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que definen el comportamiento del modelo continuo rigen también en el elemento, de esta forma se pasa de un modelo continuo con infinitos grados de libertad a un modelo con número de grados de libertad finito que se establece por un conjunto de ecuaciones lineales [21].

En el método los nodos son las incógnitas del problema, estos conectan cada elemento que contiene las propiedades del modelo. En el caso de mecánica de sólidos, las incógnitas son los desplazamientos nodales ya que a partir de estos se pueden calcular el resto de los resultados: tensiones, deformaciones. El número de variables desconocidas en cada nodo son los grados de libertad que este posee, las que determinan el estado y posición del nodo.

En el MEF se plantea la ecuación que rige el comportamiento continuo del modelo, y luego a partir de herramientas matemáticas se discretiza el modelo en elementos que unen por medio de nodos formando un enmallado en la geometría. Luego se llega a ecuaciones lineales que relacionan el comportamiento al interior de los elementos con

el valor que tomen los grados de libertad nodales. Este método se lleva a cabo por medio de funciones de interpolación, las cuales permiten calcular valores por medio de análisis numérico.

5.1.1 Ecuación de movimiento para varios grados de libertad GDL

Como se ve en el capítulo 2 para las ecuaciones de movimiento de vibración con amortiguamiento en un grado de libertad, de estas ecuaciones se destacan las constantes usadas para el análisis de las propiedades de los materiales en general, principalmente el factor de pérdida (η).

Para el MEF la representación numérica de sistemas mecánicos tiene un gran número de grados de libertad, estas son coordenadas que permiten determinar posición, velocidad y aceleración. A partir de los grados de libertad y la forma estructural del modelo estudiado como la masa y su rigidez, se pueden generar representaciones simplificadas para su estudio.

La Figura 38 se muestra un modelo simplificado de un sistema de múltiples grados de libertad editados por fuerzas armónicas, está compuesto por masas, resortes y amortiguadores.

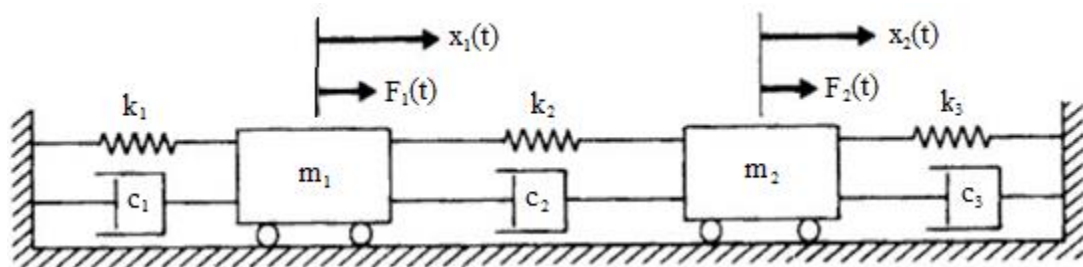


Figura 38: Modelo de varios GDL.

Para el modelo de la Figura 39 m_i se considera la masa de modelo, k_i representan la flexibilidad, los roces c_i se ilustran como un cilindro pistón representando la disipación de energía (amortiguamiento) y f_i la fuerza externa de excitación.

Se establece el equilibrio de las fuerzas del sistema de la Figura 39, el movimiento queda descritos por ecuaciones diferenciales lineales de segundo en forma matricial.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F(t)\} \quad (27)$$

Donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son matrices simétricas que representan la masa, amortiguamiento y rigidez del sistema.

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & M_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & M_n \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 & \dots & 0 \\ -c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 & \dots & 0 \\ 0 & -c_3 & (c_3 + c_4) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -c_n(c_n + c_{n+1}) \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} (k_1 + k) & -k_2 & 0 & \dots & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & \dots & 0 \\ 0 & -k_3 & (k_3 + k_4) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_n(k_n + k_{n+1}) \end{bmatrix} \quad (30)$$

Por otro lado $\{\ddot{u}(t)\}$, $\{\dot{u}(t)\}$ y $\{u(t)\}$ son vectores que representan la aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente. Estos vectores están en función del tiempo y su dimensión equivale al número de grados de libertad.

$$\{\ddot{u}(t)\} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \\ \vdots \\ \ddot{u}_n \end{Bmatrix}, \{\dot{u}(t)\} = \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \\ \vdots \\ \dot{u}_n \end{Bmatrix}, \{u(t)\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (31)$$

Por ultimo $\{F(t)\}$ representa las fuerzas externas aplicadas sobre el modelo de varios GDL.

$$\{F(t)\} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} \quad (32)$$

La solución de este problema tiene una parte homogénea y otra particular, dependiendo de las condiciones iniciales dependerá el tipo de solución y cuanto implica en los resultados finales.

- **ANSYS [22]**

ANSYS es un software de simulación ingenieril, que se basa en la metodología de elementos finitos entre otros. En este se pueden hacer simulaciones del tipo estructural estática o dinámica, transferencia de calor, mecánica de fluidos, electromagnetismo.

En el software se tienen diferentes procesos para la resolución de un cálculo. Como primera parte se establece el modelo en base a una geometría del problema, sobre este modelo se genera la malla que realiza una aproximación discreta del problema a base de nodos que se conectan formando el volumen del modelo. Luego se definen los materiales a ser usados, estos se definen en base a sus constantes numéricas, todo elemento en el modelo debe tener asignado un material. El siguiente paso es la aplicación de las condiciones de borde sobre la geometría, se finaliza con la visualización de los resultados y posterior análisis de estos.

- **Análisis transiente**

Para el análisis de este trabajo se usa el análisis transiente del software, en donde se contemplan las inercias de los modelos y el variable tiempo para las frecuencias de las diferentes vibraciones. La Figura 39 muestra el módulo a usar en ANSYS.

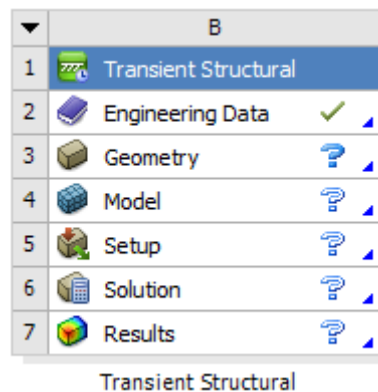


Figura 39: Módulo para el análisis de los modelos de espumas CAD.

El análisis transiente dinámico (*transient structural*) tiene como características:

- Es una técnica usada para determinar la respuesta dinámica de una estructura bajo la acción de cualquier carga general dependiente del tiempo.
- Se puede usar este tipo de análisis para en función del tiempo como varían los desplazamientos, tensiones y fuerzas en una estructura, este análisis responde a cualquier carga estática, transitoria y cargas armónicas, estas últimas es de interés en el análisis en este trabajo.
- En este análisis se consideran debido a la escala de tiempo de la carga los efectos de inercia y amortiguación.

- El análisis transiente es más complicado que un análisis estático porque requiere más recursos del equipo, por lo que los tiempos de respuestas son considerables y se necesita de equipos con gran capacidad de memoria.

5.2 Geometrías de espumas

Con el fin de representar el comportamiento mecánico de las espumas SMA estudiadas, se usan modelos geométricos con poros esféricos agrupados de forma aleatoria dentro de un volumen cilíndrico. Las geometrías usadas tienen un nivel de porosidad desde el 0% que representa un modelo macizo, hasta la mayor con un porcentaje del 51,37% de poros.

Las geometrías analizadas son 5 espumas cilíndricas de 13 mm de diámetro y 15 mm de altura y una maciza, con esta última se busca representar las diferencias ventajosas que se producen en los resultados al introducir porosidad en los modelos.

La Figura 40 se muestra las probetas CAD “*computer-aided design*” (diseño asistido por computador) usadas para el análisis en este trabajo.

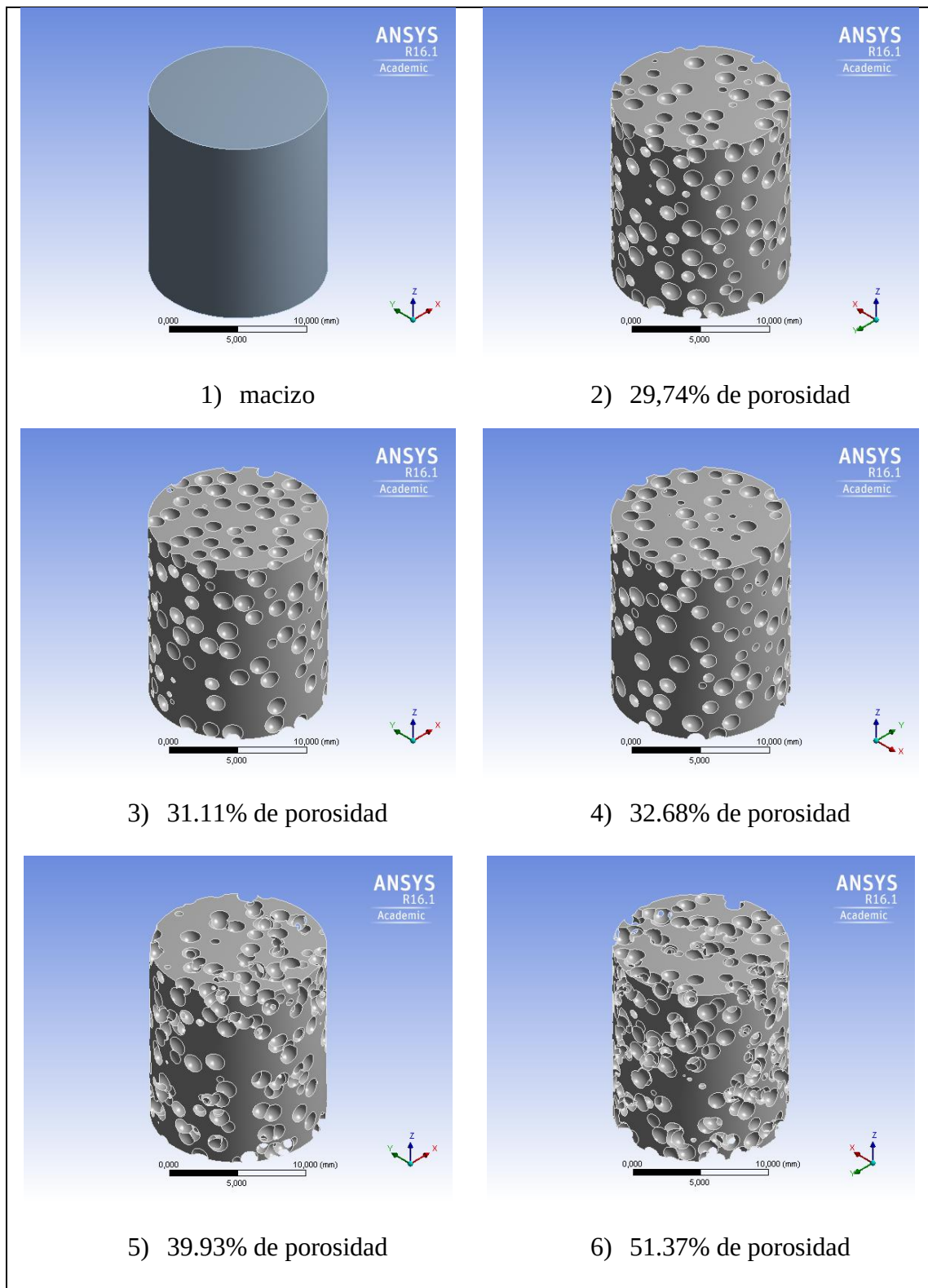


Figura 40: Modelos de probetas CAD analizadas

5.3 Enmallado

El enmallado es uno de las etapas importantes en el método de elementos finitos, en esta se definen el tipo de malla con sus características, el modelo de elementos a usar y la calidad que se obtiene.

Los elementos usados para generar la malla es SOLID186, es generado de forma automática por el *Workbench*. El SOLID186 es un elemento tridimensional con tres grados de libertad por nodo (traslación según X, Y y Z). Permite formulación de materiales con plasticidad, endurecimiento, fluencia y capacidad de grandes deformaciones. Está compuesto por 20 nodos distribuidos según el esquema presentado en la Figura 41. Además de su configuración base hexaédrica puede tener una configuración piramidal, prismática o tetrahédrica lo que le permite adaptarse a la geometría de la pieza. En la Figura 41 se muestran las diferentes formas que adopta el elemento a partir del modelo estudiado.

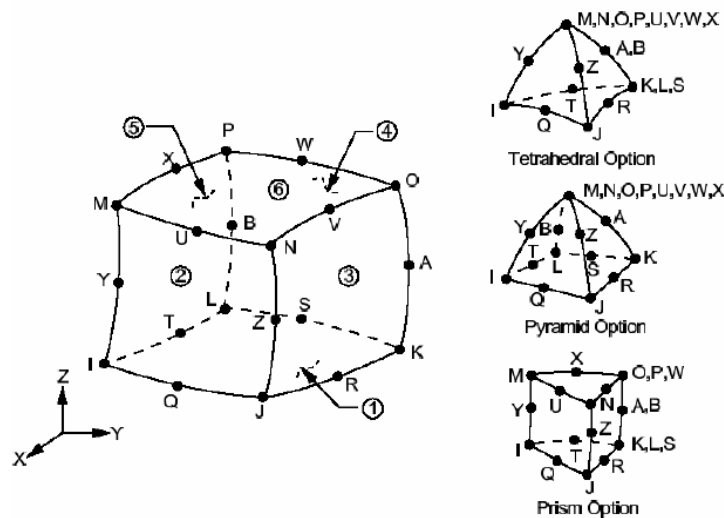


Figura 41: Geometría del elemento SOLID186

- **Verificación de calidad de enmallado**

Después de generar la malla en el modelo se puede medir su calidad a partir de dos parámetros importantes: *Element Quality* (Calidad de elementos) y *Skewness* (Asimetría).

***Element Quality*:** Este parámetro compara la forma de los elementos de la malla de un sólido, respecto a la exigida por el usuario de software, siendo 1 la representación perfecta de la forma deseada y 0 la peor representación. La Figura 42 muestra los tipos de elementos generados.

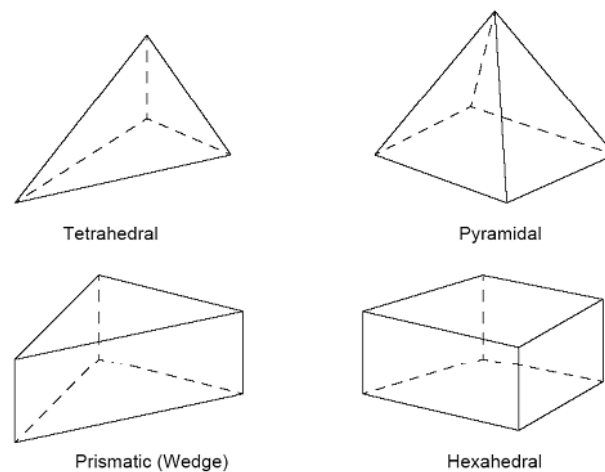


Figura 42: Forma de los elementos de una malla

***Skewness*:** Esta medida en la calidad es la más importante, esta determina que tanto se acerca nuestra malla a un triángulo equilátero. De acuerdo a la definición de *Skewness*, si el valor se acerca a cero, el triángulo de los nodos se aproxima a ser equilátero y si se acerca al valor uno se acerca a una “astilla”. Por lo que, triángulos con ángulos muy grandes y ángulos muy pequeños, se deben evitar en la construcción de la malla. La Tabla 5 indica la calidad del enmallado respecto al parámetro de *skewness* calculado.

Tabla 5: Indicador de calidad de malla a partir del *Skewness*.

<i>Skewness</i> (S)	Calidad de Malla
1	Degenerada
$1 > S > 0.9$	Mediocre
$0.9 > S > 0.75$	Pobre
$0.75 > S > 0.5$	Más o Menos
$0.5 > S > 0.25$	Buena
$0.25 > S > 0$	Excelente
0	Perfecta

Jacobiano: El valor de jacobiano mide la distorsión de los elementos generados en el enmallado. Como se mencionó antes el MEF calcula para cada nodo de la malla una solución aproximada de las ecuaciones diferenciales parciales que describen un fenómeno físico, para este propósito, un elemento se define en un sistema de matriz de referencia (ξ_1, ξ_2, ξ_3) , donde cada referencia esta relacionada con su contraparte real dentro del elemento en un dominio (x_1, x_2, x_3) a través de un función de forma F , es decir, se realiza un mapeo entre el espacio real y un espacio ideal unitario, como muestra la Figura 43.

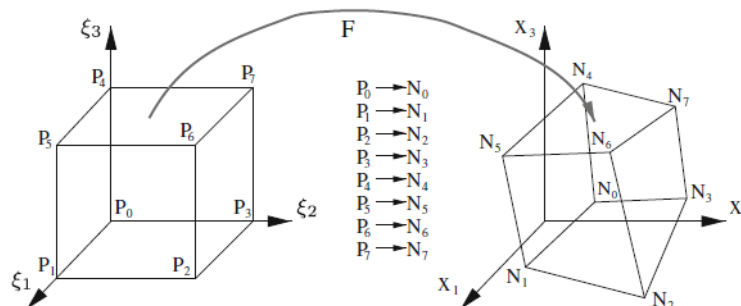


Figura 43: Referencia de la cual se deriva la matriz jacobiana, izquierda el espacio de referencia, derecha el enmallado real. [23]

Para poder medir la calidad del enmallado se calcula una relación entre el determinante del jacobiano en la matriz de un nodo y un valor global de distorsión, este último está dado por el valor máximo de los determinantes de los jacobianos en todos los nodos del elemento. Este criterio de calidad se conoce como *Jacobian Ratio* o JR. Matemáticamente el JR en el nodo ξ_0 tomado dentro de un elemento e_0 se calcula como:

$$JR_e^{\xi_0} = \frac{|J(\xi_0)|}{\max_{\xi \in e} \{|J(\xi)|\}}, \quad (33)$$

Cuando el valor de JR es negativo no es considerada una malla adecuada para el análisis, el elemento tiene una elevada deformación teniendo una mala medición. Al contrario, cuando el valor de JR es positivo, pero cerca de cero, el elemento presenta una mala calidad en el nodo. A medida que JR va aumentando también lo hace la calidad de elemento hasta alcanzar un valor óptimo de 1.

Por lo general es imposible encontrar una configuración de enmallado donde todos los JR dentro de la malla tengan valor ideal de 1, por lo que se opta por seguir las recomendaciones en el software de análisis comercial ANSYS, donde un elemento representa una mala calidad cuando cualquier nodo tiene un valor de JR inferior a 0.03. Una buena calidad de nodo, por lo tanto, tiene todos sus valores de JR en el intervalo $[0.03 ; 1]$ [23].

- **Enmallado generado en ANSYS Workbench**

Las especificaciones de la malla utilizada se pueden ver en la Figura 44, se ha elegido una calidad media en las características importantes del enmallado, por la capacidad de cálculo de los equipos utilizados. Los modelos de espumas utilizados son de gran complejidad geométrica, por lo que los resultados obtenidos al comparar un modelo de enmallado fino que tiene una elevada cantidad de elementos y nodos con respecto a una malla media, no se diferencian para los resultados que se está analizando en este trabajo.

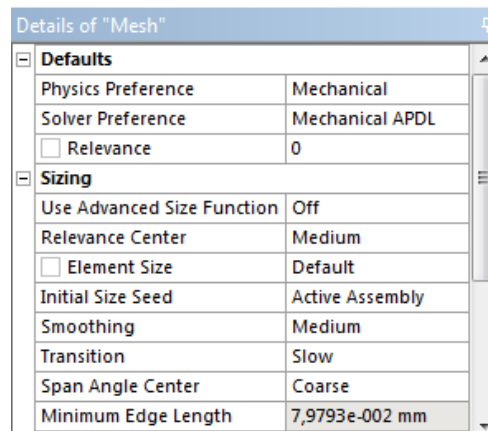


Figura 44: Característica de la malla en ANSYS para el modelo CAD

Por otro lado, los valores de *Element Quality* y *Skewness* calculados son buenos. El problema de trabajar con este tipo de mallas es la cantidad de tiempo que requieren los cálculos para generar la solución y post-procesar los resultados.

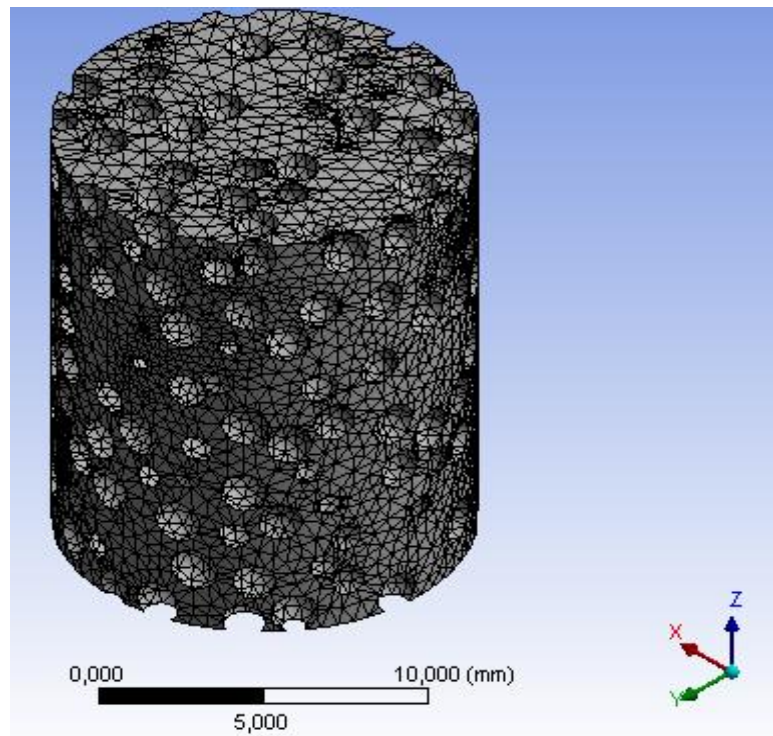


Figura 45: Enmallado en modelo CAD espuma con 29,74 % de porosidad

Los valores estadísticos de *Element Quality*, *Skewness* y *jacobiano* para las mallas desarrolladas que entregan la calidad trabajada se pueden ver en el Anexo 1.

5.4 Propiedades del material CuAlBe

Para realizar el análisis de MEF en ANSYS se debe generar el material que se va a utilizar en el análisis con sus propiedades específicas necesarias para generar los cálculos.

En la biblioteca de materiales del programa existe un material superelástico genérico Figura 46. El algoritmo que representa este material se encuentra en el manual de ANSYS [22]. Para que el material represente bien el comportamiento se necesitan de 6 constantes de superelasticidad que se representan en la Figura 47.

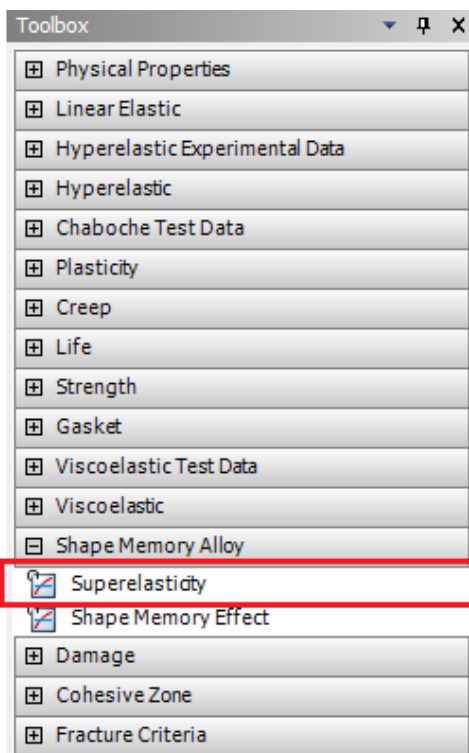


Figura 46: Material superelástico en biblioteca de ANSYS.

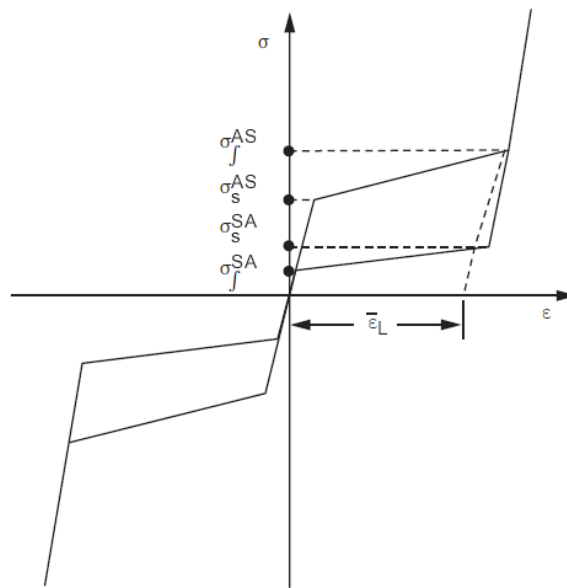


Figura 47: Idealización en ANSYS del comportamiento superelástico de un material con memoria de forma SMA

Las seis constantes que definen el comportamiento de un material con memoria de forma en ANSYS se describen en la Tabla 6.

Tabla 6: Parámetros del material SMA superelástico.

Constante	Significado
σ_s^{AS}	Tensión de inicio transformación martensítica
σ_f^{AS}	Tensión de fin transformación martensítica
σ_s^{SA}	Tensión de inicio transformación martensítica inversa
σ_f^{SA}	Tensión de fin transformación martensítica inversa
$\bar{\epsilon}_L$	Deformación residual máxima superelástico
α	Parámetro de diferencia entre compresión y tensión.

Además de las propiedades de superelasticidad se encuentran las de elasticidad del material y su densidad, estas son necesarias para el análisis a desarrollar.

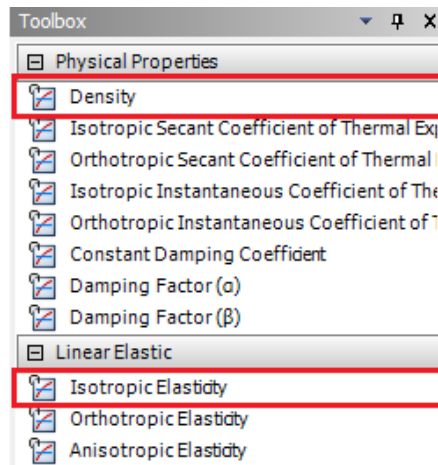


Figura 48: Propiedades de elasticidad y densidad en ANSYS.

En base a los estudios de tracción y disipación de energía del CuALBe la Tabla 7 resume las propiedades de entrada para el software.

Tabla 7: Propiedades de entrada CuALBe

Densidad	7000 [kg/m ³]
Módulo de Young	82300 [MPa]
Coeficiente de Poisson	0,3
σ_s^{AS}	228 [MPa]
σ_f^{AS}	350 [MPa]
σ_s^{SA}	250 [MPa]
σ_f^{SA}	50 [MPa]
$\bar{\epsilon}_L$	0,033
α	0

El valor de α caracteriza la respuesta del material en tensión y compresión, para efectos de facilitar la respuesta del análisis se consideran iguales con valor $\alpha = 0$. Los resultados arrojados en ANSYS al compararlos con el ensayo de tracción de carga y descarga hecho en el estudio de A. Duran [19] se detallan en la gráfica de la Figura 49. El estudio de A. Duran se realiza sobre una probeta de diámetro 3,4 mm, largo de 25 mm, con una velocidad de tracción en carga y descarga de 25 mm/min, la deformación máxima para el ensayo fue de 3,3%.

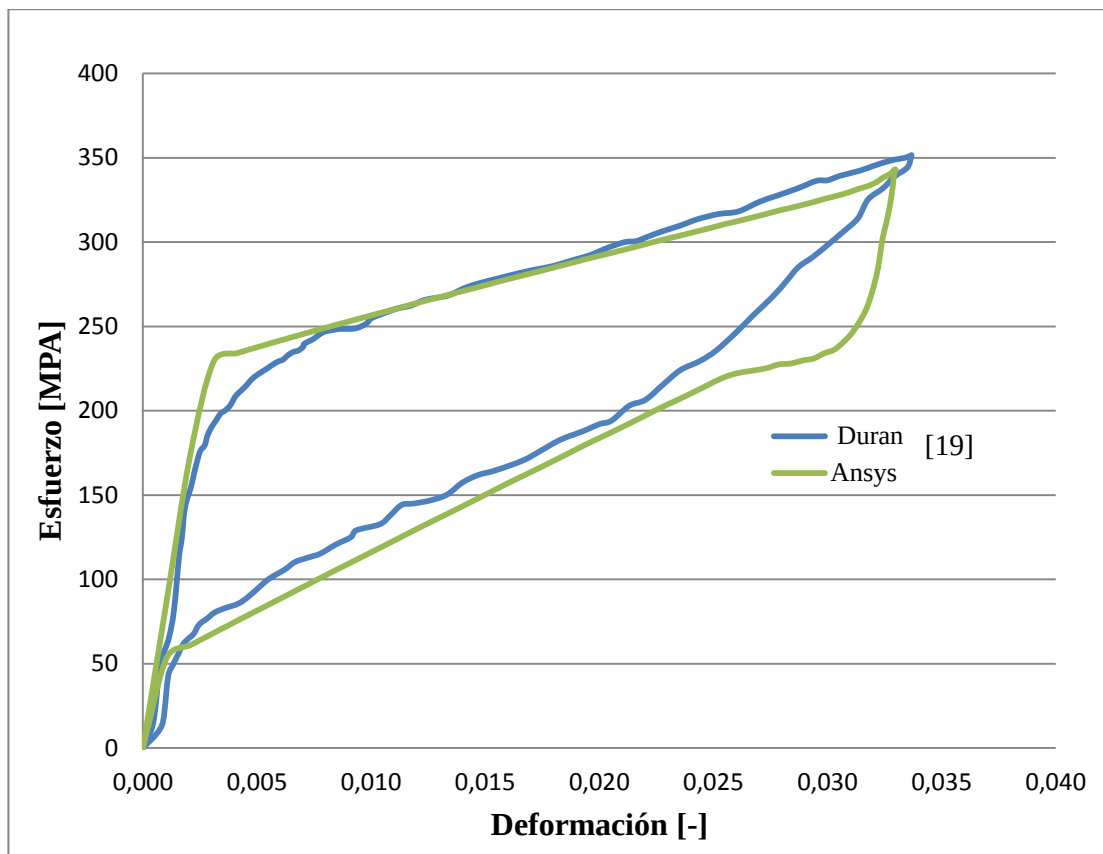


Figura 49: Gráfica de calibración del modelo SMA en Ansys.

Se tienen en consideración varios puntos para entender el modelo con estos datos de entrada. Primeramente el algoritmo del elemento SMA de ANSYS se desarrolló para materiales superelástico con un comportamiento cercano al Nitinol. La diferencia

mayor que tiene el CuAlBe con el Nitinol es que la pendiente del segundo tramo de la gráfica o “bandera” entre σ_s^{AS} y σ_f^{AS} es bastante alta, esto implica que σ_s^{SA} es mayor que σ_s^{AS} . El algoritmo funciona de la manera en que cuando crece la carga, el punto (σ, ε) sigue la curva de la carga en forma de la “bandera”. Una vez que cambia el sentido de la velocidad de carga la tensión baja con una pendiente igual al módulo de Young hasta que la tensión sea igual a σ_s^{SA} , y luego cambia hasta llegar al punto σ_f^{SA} . Con este comportamiento del algoritmo se adopta el modelo para poder reproducir los ensayos. Se debe tener en cuenta que el modelo se desarrolla bajo una deformación del 3,3%, una sollicitación mayor a ese valor generara una “bandera” de mayor envergadura aumentando el valor de σ_f^{AS} y nunca se pasara a la segunda elasticidad en el estado de 100% martensita.

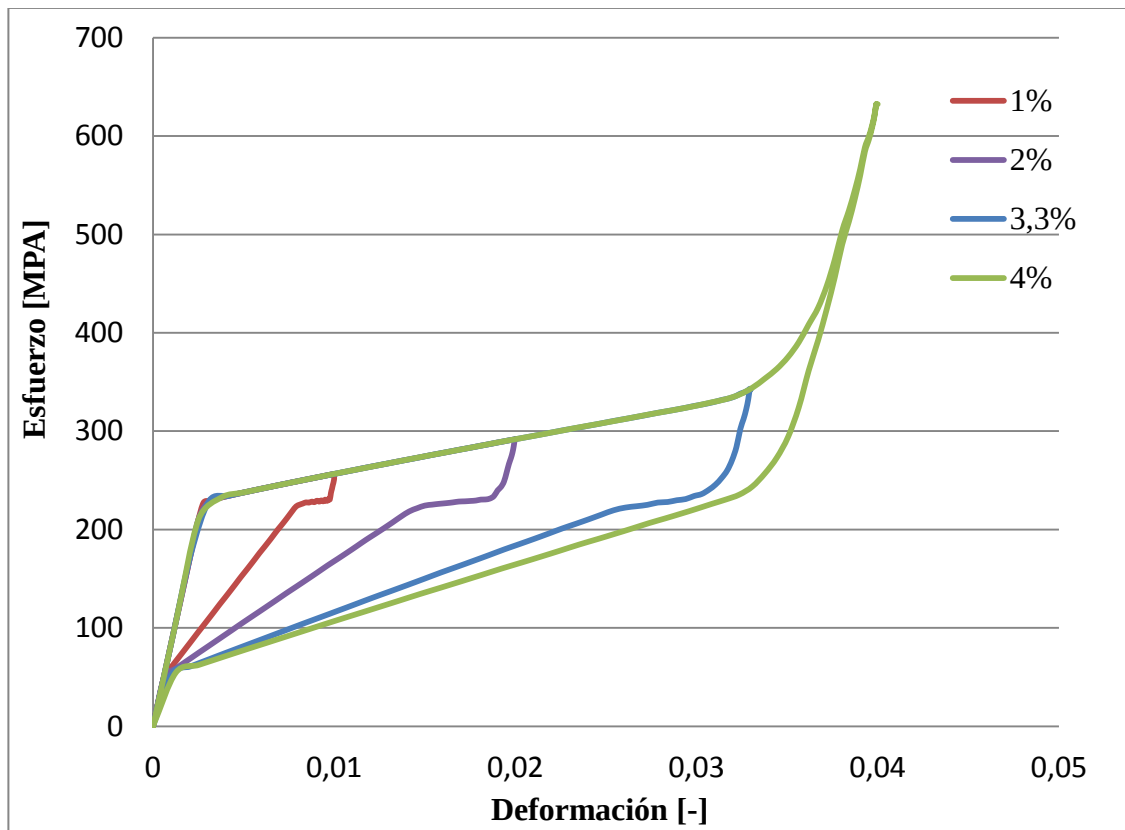


Figura 50: Comportamiento del material SMA CuAlBe en ANSYS para 4 diferentes deformaciones (1%, 2%, 3,3%, 4%).

5.5 Condiciones de contorno del modelo

La condición de contorno es la fuerza y tipos de desplazamientos a las cuales los modelos de espumas CAD serán sometidas y calculados en el MEF.

La primera condición, es restringir el desplazamiento de la cara inferior de la probeta en el eje Z. Esta se logra imponiendo un desplazamiento igual a 0 [mm] en el eje Z, por lo que al aplicar una fuerza el modelo no se desplaza en dicho eje. La Figura 51 se aprecia esta condición en el modelo y la Figura 52 muestra el detalle del desplazamiento en la ventana de definición de parámetros ANSYS.

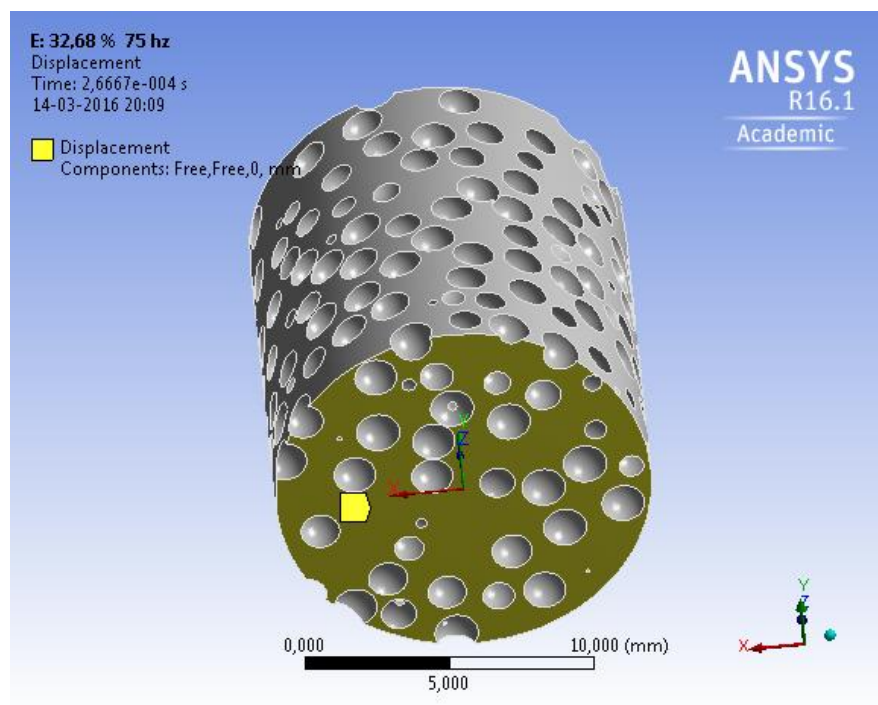


Figura 51: Condición de contorno en base inferior con desplazamiento 0 [mm] en eje Z, la probeta tiene un 32,68% de porosidad.

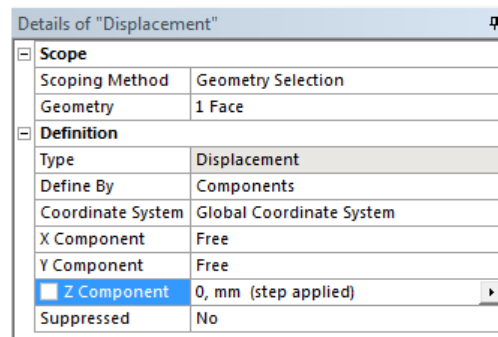


Figura 52: Detalle de la condición de contorno en ANSYS.

La segunda condición es muy importante para obtener resultados coherentes, consiste en el acoplamiento de los nodos de la cara superior con un desplazamiento remoto, esto tiene como finalidad obtener una deformación igual en todos los puntos de la cara superior de las probetas, en un ensayo de compresión la cara que se comprime tiene un desplazamiento uniforme. La Figura 53 se aprecia esta condición en el modelo.

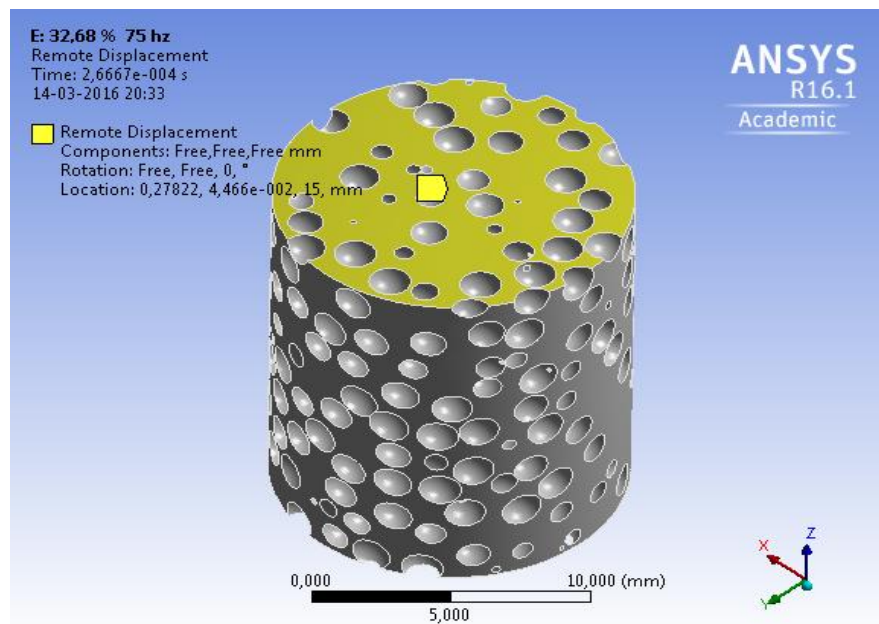


Figura 53: Condición de contorno en cara superior desplazamiento remoto, la probeta tiene un 32,68% de porosidad.

Para aplicar el desplazamiento remoto se debe seleccionar la cara superior de la probeta que es donde se aplicara y aplicar la condición *remote displacement*. En la parte de detalles esta la opción del comportamiento *Coupled*. La Figura 54 se ve el detalle del desplazamiento en la ventana de definición de parámetros de ANSYS.

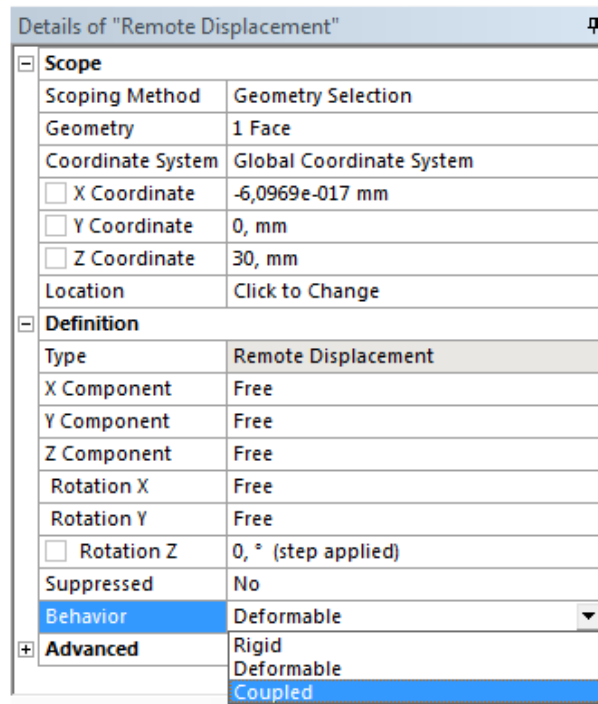


Figura 54: Detalles de la condición de desplazamiento remoto en ANSYS.

La última condición de contorno es la fuerza en función del tiempo con forma sinusoidal que genera la deformación en la espuma, la carga se aplica con frecuencias de 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz, 100 Hz, 125 Hz y 150 Hz. Se aplican amplitudes de 45 [KN], 42 [KN], 39 [KN] y 36 [KN].

Las frecuencias aplicadas equivalen al rango de operaciones en máquinas rotativas para la industria en general, por otro lado la amplitudes de las fuerzas aplicadas se definieron en base a un cilindro macizo sin porosidad de las dimensiones de 13 [mm] de diámetro y 15 [mm] de altura. Con la amplitud máxima de 45 [KN] se llega al

esfuerzo máximo de 350 [MPa] que indica una transformación en la totalidad del modelo en martensita. Ver Figura 55.

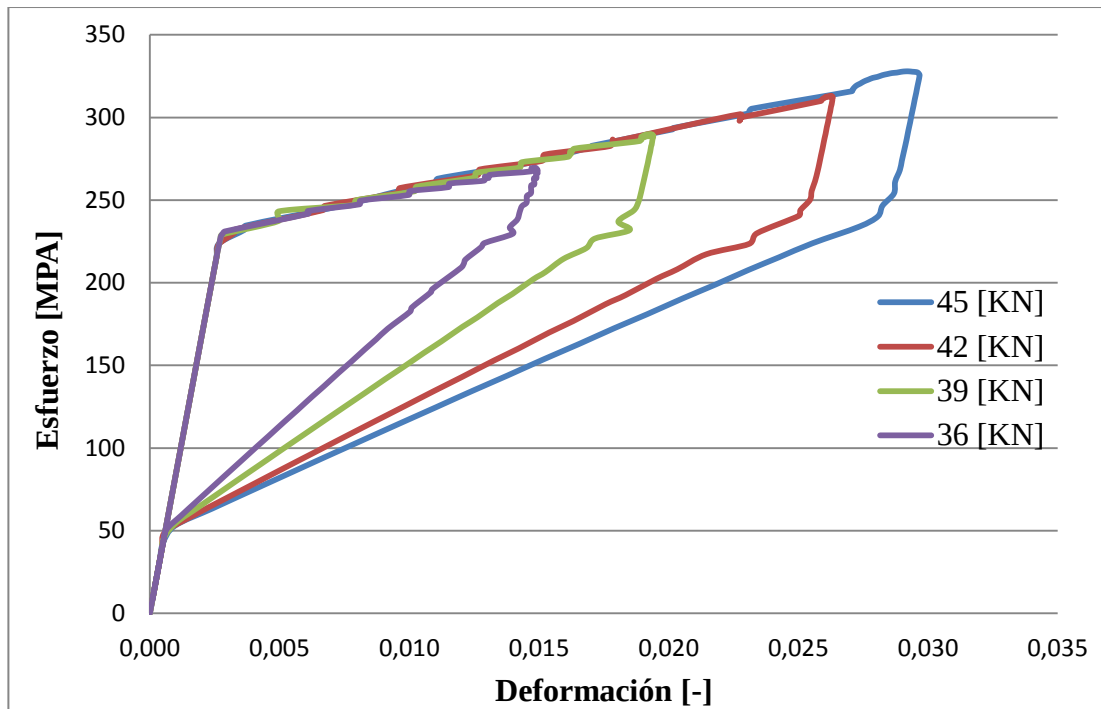


Figura 55: Deformaciones generadas de una probeta maciza en MEF para cada amplitud del análisis. Deformaciones de 2,9%; 2,6%; 1,9%; 1,5% para amplitudes de 45 [KN], 42 [KN], 39[KN], 36 [KN] respectivamente.

La vibración del tipo sinusoidal se aplica para cada modelo como se muestra en la Figura 56 y Figura 57. Se tiene que para cada fuerza de amplitud, un número de 6 frecuencias y sumado las 6 probetas porosas (0%, 29,74%, 31,11%, 32,68%, 39,93%, 51,37%) un total de 144 análisis en ANSYS.

Para el análisis se considera un solo periodo en cada frecuencia, esto debido a que el software no acumula en sus cálculos solicitaciones residuales producto del número de ciclos reiterativos, el resultado del segundo ciclo será el mismo que el primero para

una frecuencia fija cualquiera, por lo tanto, esto simplifica el tiempo de lo que se emplea en el análisis.

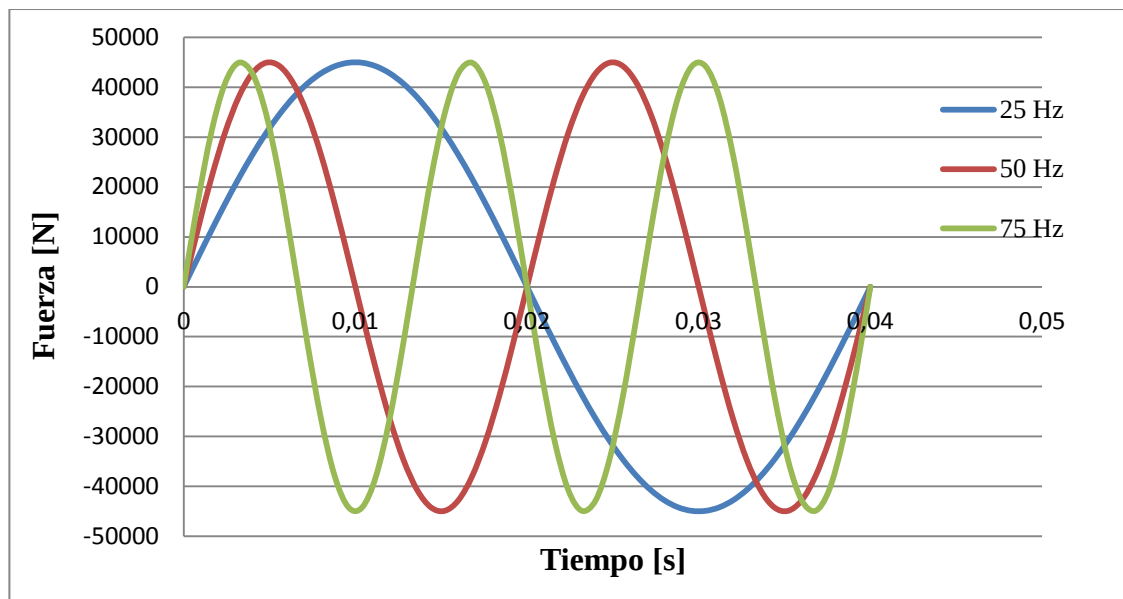


Figura 56: Carga sinusoidal con una amplitud de 45 [KN] para frecuencias de 25 Hz, 50 Hz y 75 Hz.

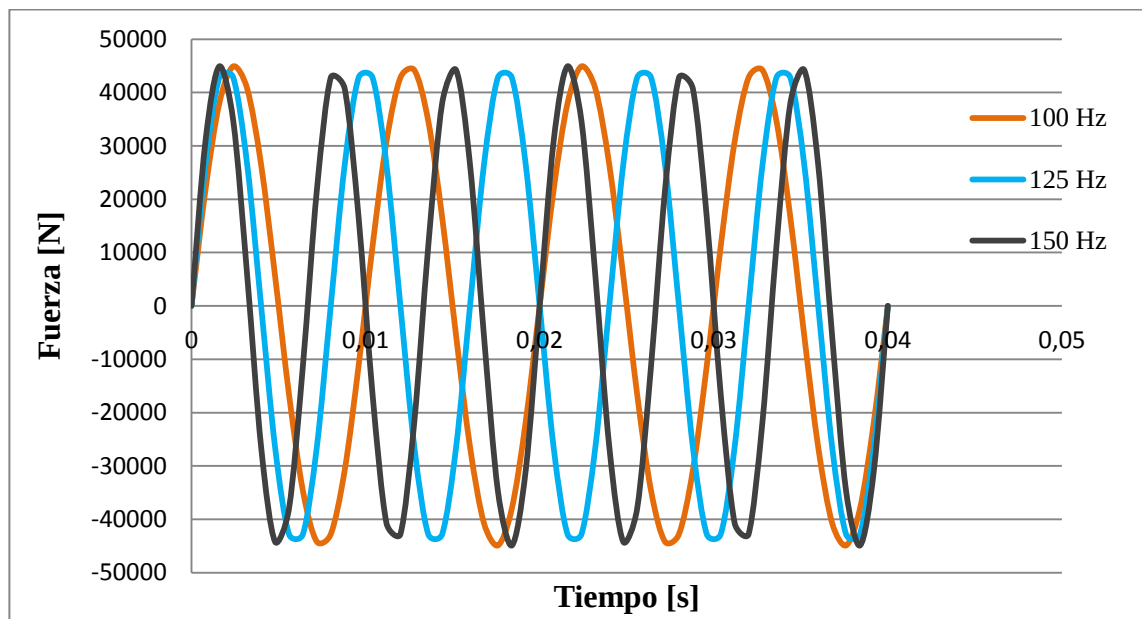


Figura 57: Carga sinusoidal con una amplitud de 45 [KN] para frecuencias de 100 Hz, 125 Hz y 150 Hz.

En la condición de borde de las fuerzas sinusoidales se tienen varias consideraciones para el análisis, el módulo *Transient Structural* tiene como ventaja el análisis por partes, esto entrega ventajas en el cálculo, debido a que se analiza una fuerza o desplazamiento en función de intervalos discretos de tiempo. Primeramente se parte por calcular el periodo para las frecuencias analizadas, siendo el periodo (T [segundos]) igual al inverso de la frecuencia (f [Hz]). Con el periodo se establece el tiempo de un ciclo de la fuerza sinusoidal aplicada al modelo, se tiene en *Analysis Settings* el parámetro *Step End Time* donde su valor es el periodo, la Figura 58 muestra lo explicado para una frecuencia de 25 Hz con un periodo de 0,04 [s].

Por otro lado, definido el periodo en segundos, este se dividió en 50 *Step* o intervalos del mismo tamaño, se opta por este número de divisiones para tener una continuidad aproximada en el análisis, evitando cambios muy repentinos en los resultados entre intervalos contiguos. La Figura 59 muestra el periodo de 0,04 [s] dividido en 50 *Step* iguales.

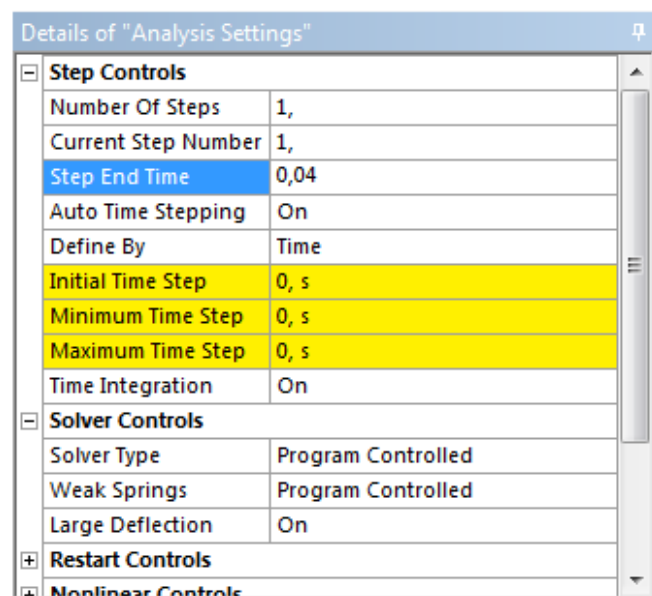


Figura 58: Detalle del periodo en ANSYS.

Tabular Data			Tabular Data		
	Steps	End Time [s]		Steps	End Time [s]
1	1	8,e-004	26	26	2,08e-002
2	2	1,6e-003	27	27	2,16e-002
3	3	2,4e-003	28	28	2,24e-002
4	4	3,2e-003	29	29	2,32e-002
5	5	4,e-003	30	30	2,4e-002
6	6	4,8e-003	31	31	2,48e-002
7	7	5,6e-003	32	32	2,56e-002
8	8	6,4e-003	33	33	2,64e-002
9	9	7,2e-003	34	34	2,72e-002
10	10	8,e-003	35	35	2,8e-002
11	11	8,8e-003	36	36	2,88e-002
12	12	9,6e-003	37	37	2,96e-002
13	13	1,04e-002	38	38	3,04e-002
14	14	1,12e-002	39	39	3,12e-002
15	15	1,2e-002	40	40	3,2e-002
16	16	1,28e-002	41	41	3,28e-002
17	17	1,36e-002	42	42	3,36e-002
18	18	1,44e-002	43	43	3,44e-002
19	19	1,52e-002	44	44	3,52e-002
20	20	1,6e-002	45	45	3,6e-002
21	21	1,68e-002	46	46	3,68e-002
22	22	1,76e-002	47	47	3,76e-002
23	23	1,84e-002	48	48	3,84e-002
24	24	1,92e-002	49	49	3,92e-002
25	25	2,e-002	50	50	4,e-002

Figura 59: Periodo de 0,04 [s] divididos en 50 Steps iguales, ANSYS.

Con el periodo dividido en Steps iguales, se continúa por configurar el análisis de tal forma que entregue 4 resultados en cada Step subdivididos en intervalos del mismo tamaño de tiempo, con esto se obtiene 200 resultados finales para el análisis en cada instante de tiempo del ciclo, distribuidos de forma continua. El valor del tamaño de estos intervalos se define en la ecuación siguiente:

$$ITS = \frac{1}{N^{\circ}_{Subintervalos} * N^{\circ}_{Steps} * f}, \quad (34)$$

donde el ITS es *Initial Time Steps*, $N^{\circ}_{Subintervalos}$ equivale al número de subintervalos dentro de cada Steps, el N°_{Steps} es el número de Steps que se usan en el análisis y f es la frecuencia para el análisis en unidades de Hertz. Para un valor de 4 subintervalos y 50 Steps en una frecuencia de cálculo de 70 Hz se tiene un ITS de 6,67E-5, la Figura 60 muestra el detalle de este valor en ANSYS.

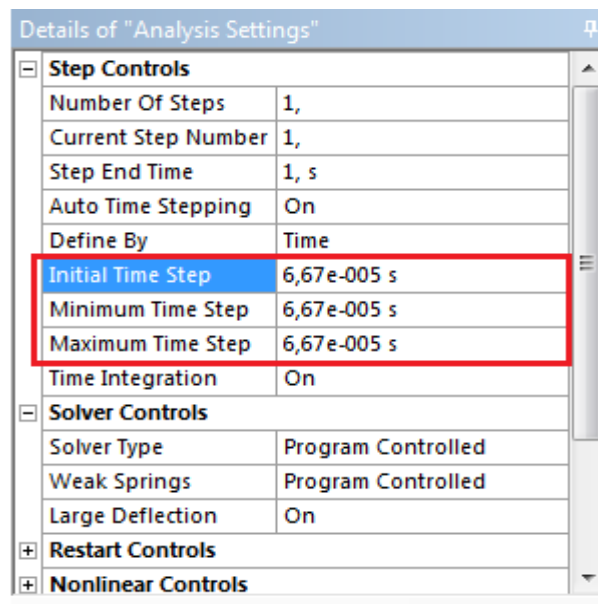


Figura 60: Detalle del ITS en ANSYS.

Luego de definir las etapas que arrojan resultados en el cálculo, se dispone a definir la fuerza distribuida en el tiempo de forma sinusoidal en el eje Z, para ello cada intervalo de Steps equivale un tramo en el tiempo de la fuerza aplicada, se tabula está en función del tiempo. La Figura 61 detalla la carga distribuida en el tiempo para el análisis de ANSYS.

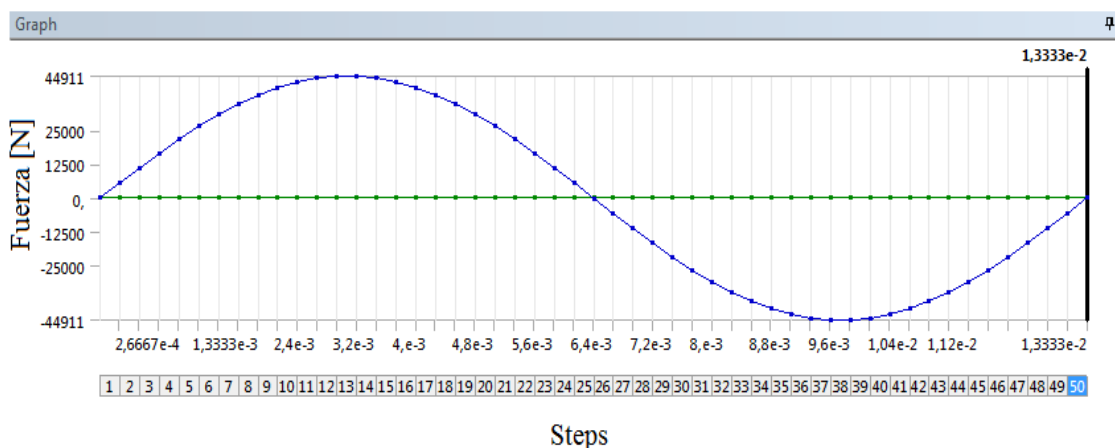


Figura 61: Fuerza (línea azul) distribuida en el tiempo para el análisis de ANSYS.

La Figura 62 se muestra la fuerza aplicada sobre un modelo con porosidad 32,68 %, el análisis parte con la tracción de la espuma para luego seguir con su compresión, terminando en el estado inicial, esta condición de borde se aplica en la base superior y se representa en color rojo.

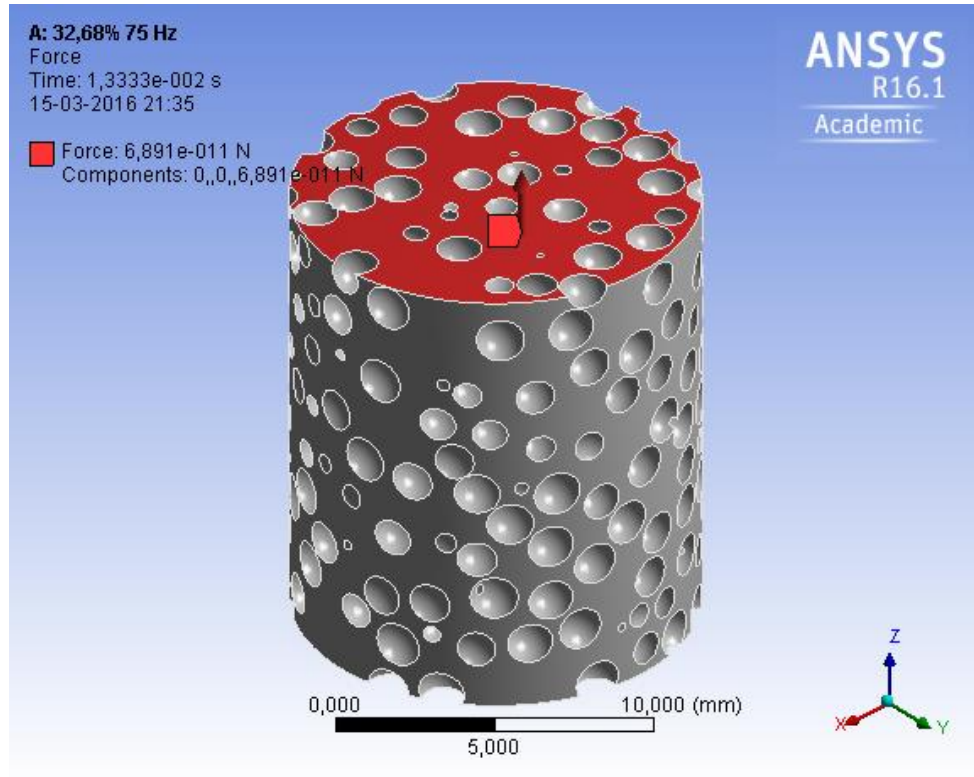


Figura 62: Condición de contorno en cara superior, la probeta tiene un 32,68% de porosidad.

6 Resultados

Aplicadas las respectivas condiciones de borde para las diferentes geometrías se obtuvieron las siguientes curvas de histéresis.

6.1 Amplitud de 45 [KN]

6.1.1 Probeta maciza.

La Figura 63 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 45 [KN].

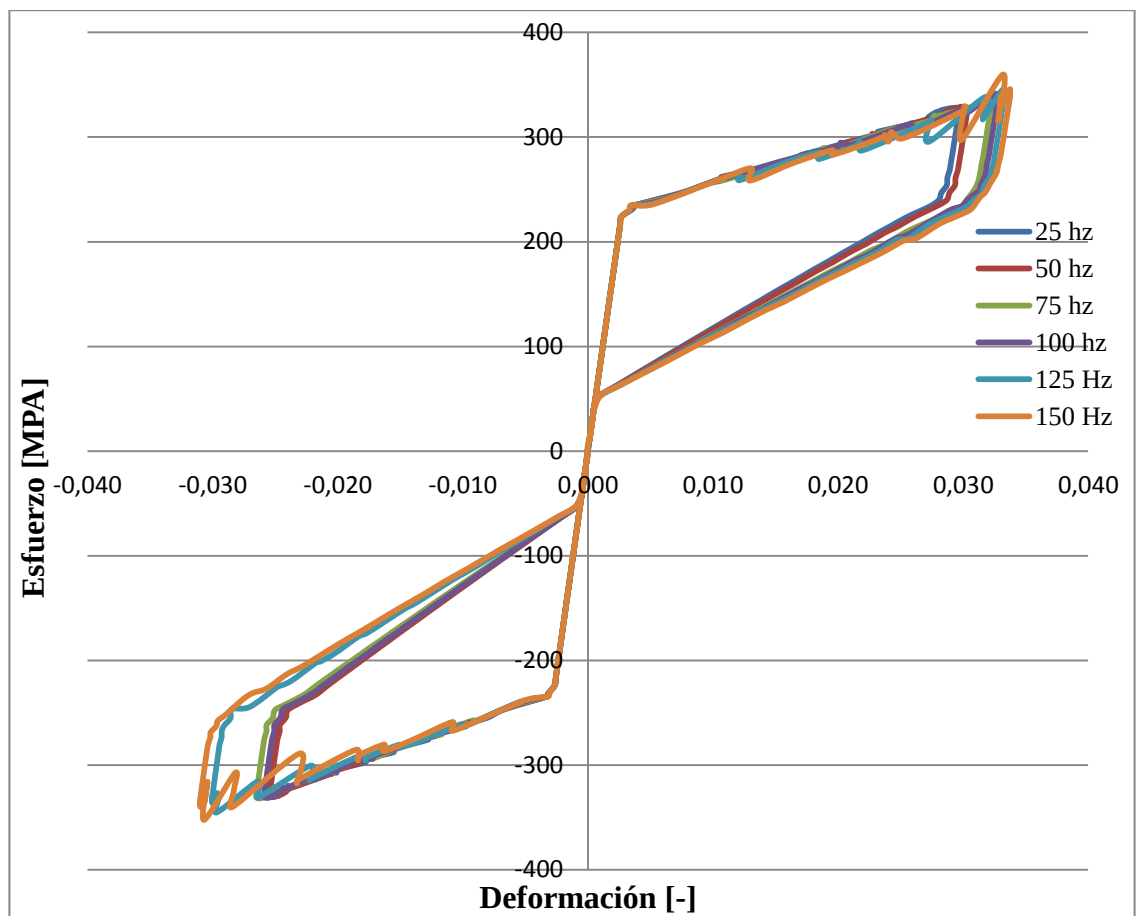


Figura 63: Curva esfuerzo vs deformación de probeta maciza.

6.1.2 Probeta con 29,74% de porosidad.

La Figura 64 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 45 [KN].

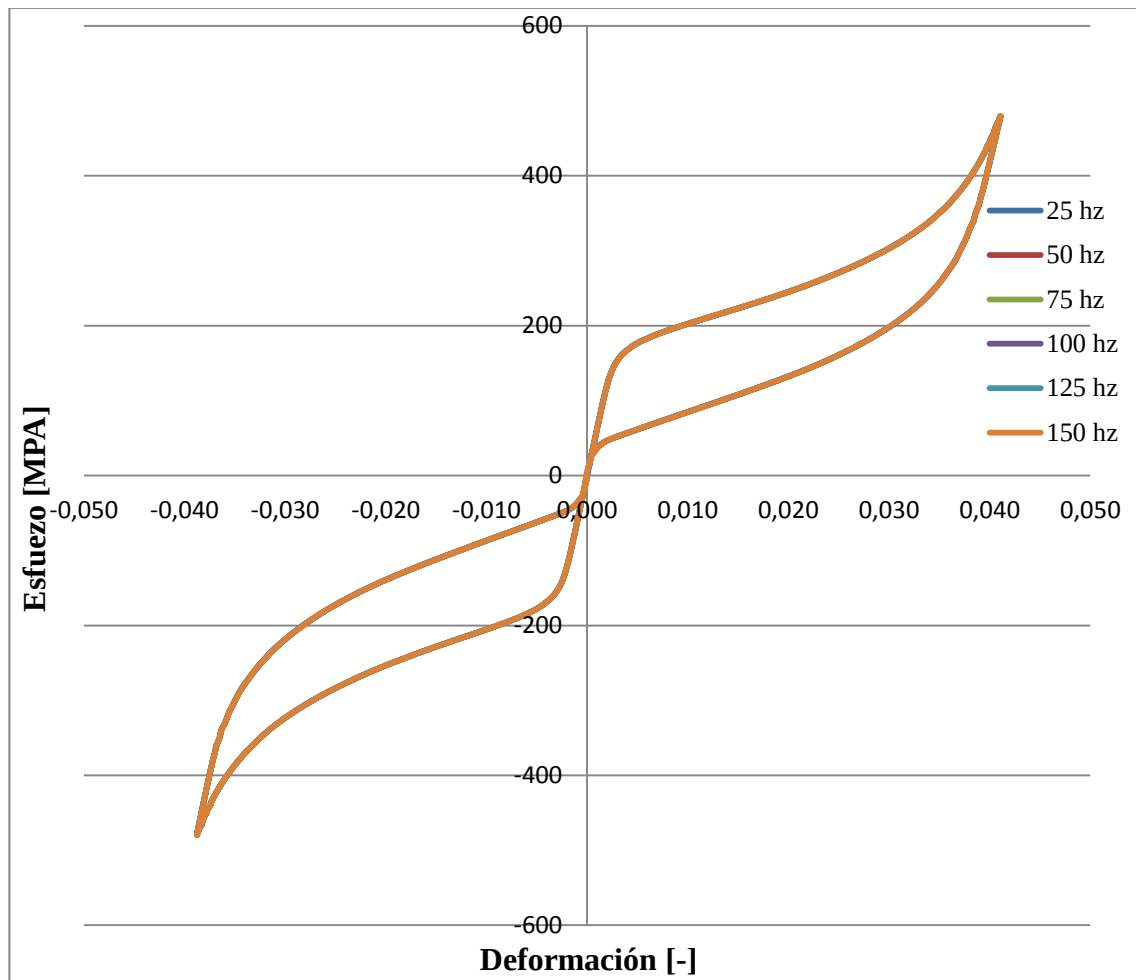


Figura 64: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 29,74 % de porosidad.

6.1.3 Probeta con 31,11 % de porosidad.

La Figura 65 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 45 [KN].

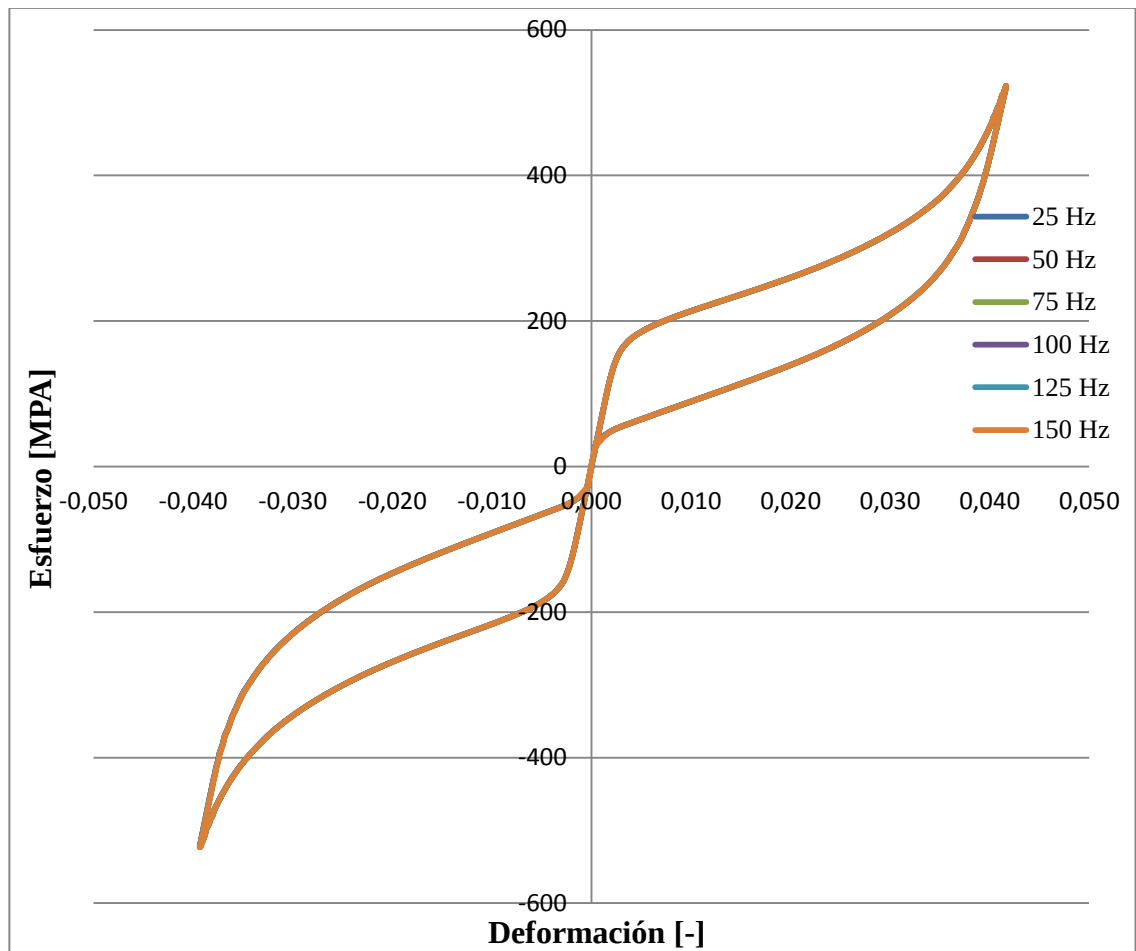


Figura 65: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 31,11 % de porosidad.

6.1.4 Probeta con 32,68 % de porosidad.

La Figura 66 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 45 [KN].

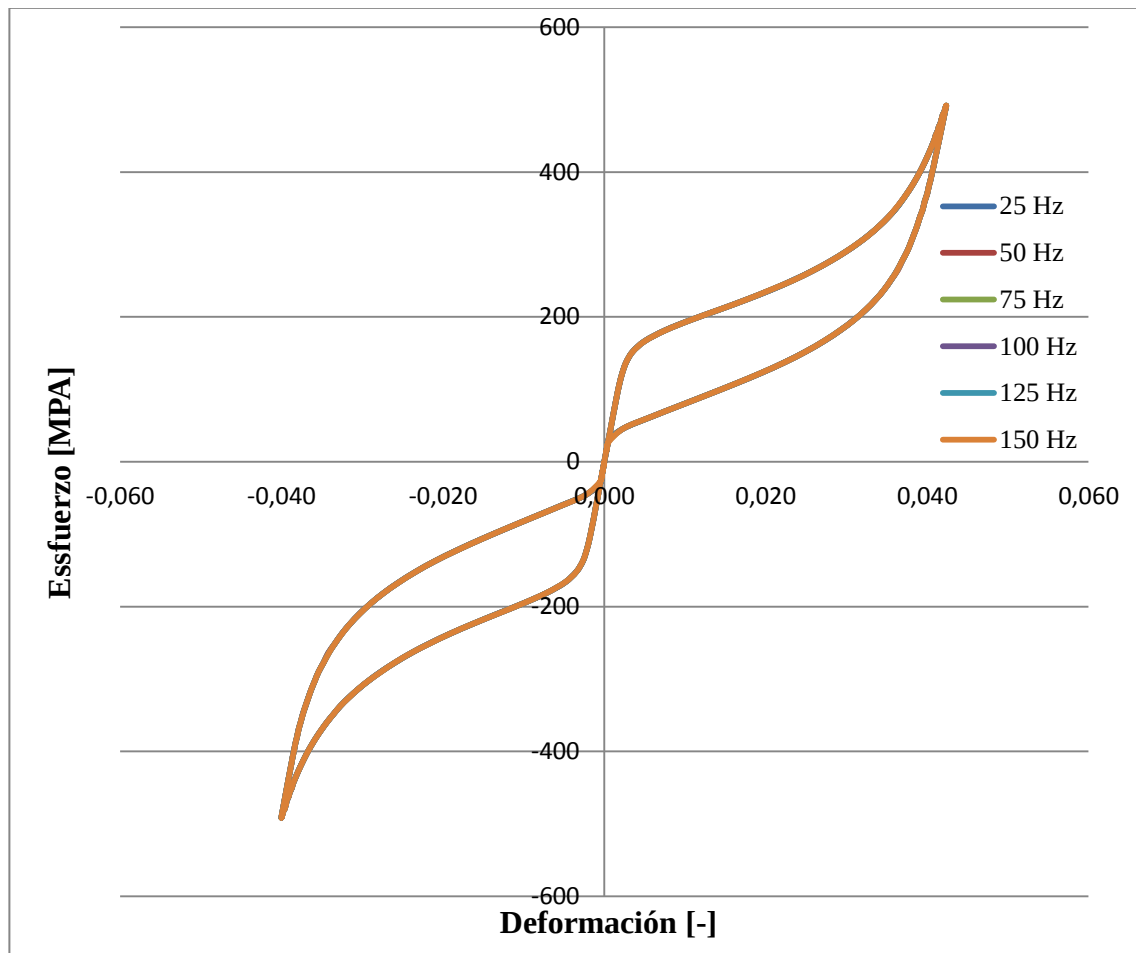


Figura 66: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 32,68 % de porosidad.

6.1.5 Probeta con 39,93 % de porosidad.

La Figura 67 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 45 [KN].

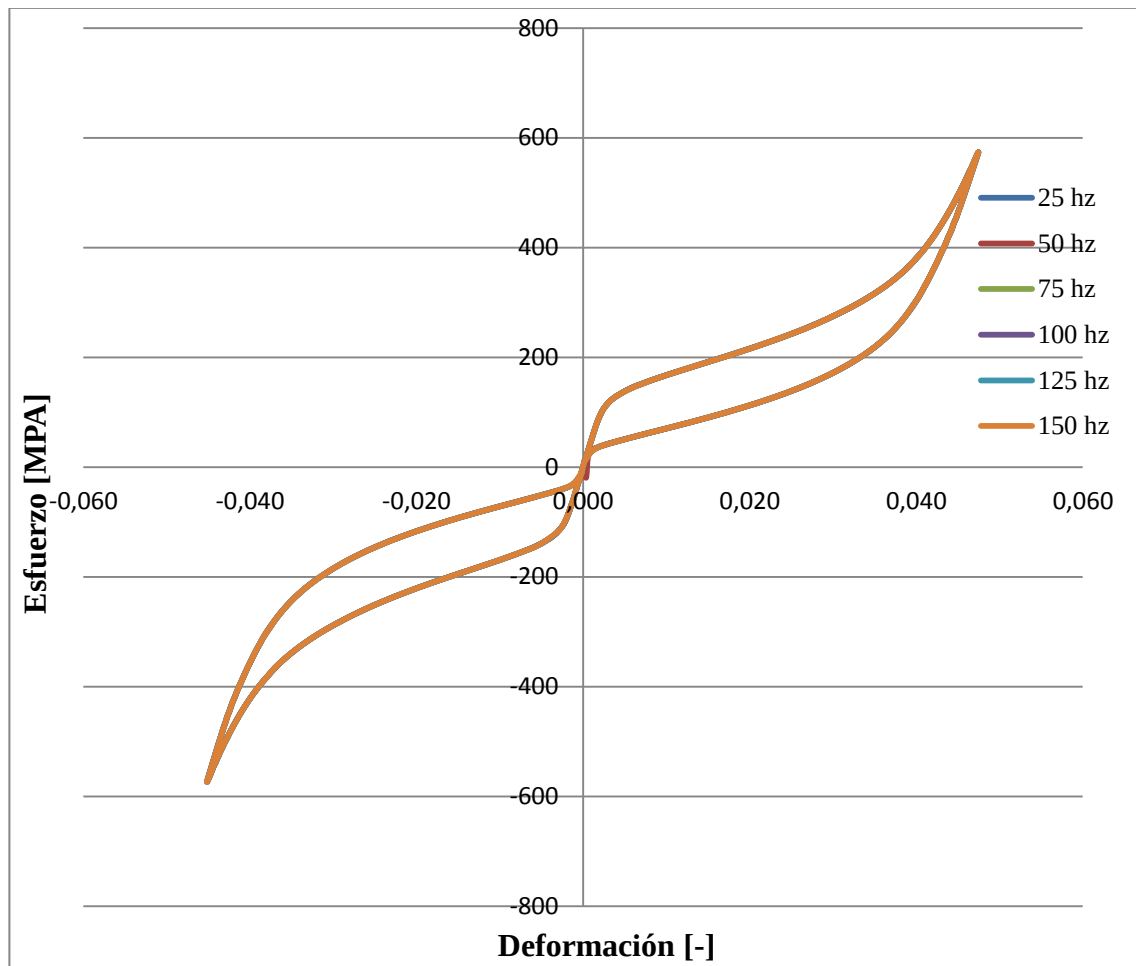


Figura 67: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 39,93 % de porosidad.

6.1.6 Probeta con 51,37 % de porosidad.

La Figura 68 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 45 [KN].

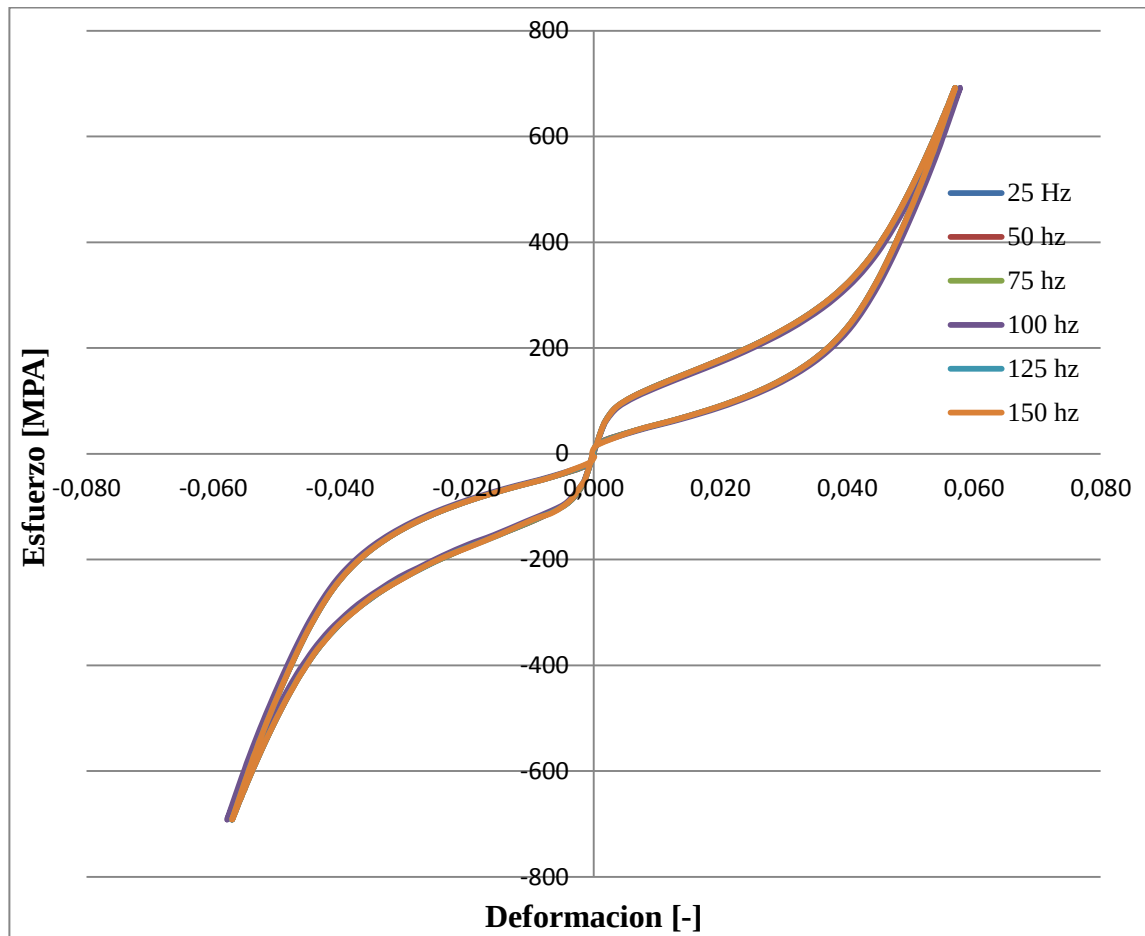


Figura 68: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 51,37 % de porosidad.

6.2 Amplitud de 42 [kN]

6.2.1 Probeta maciza.

La Figura 69 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 42 [kN].

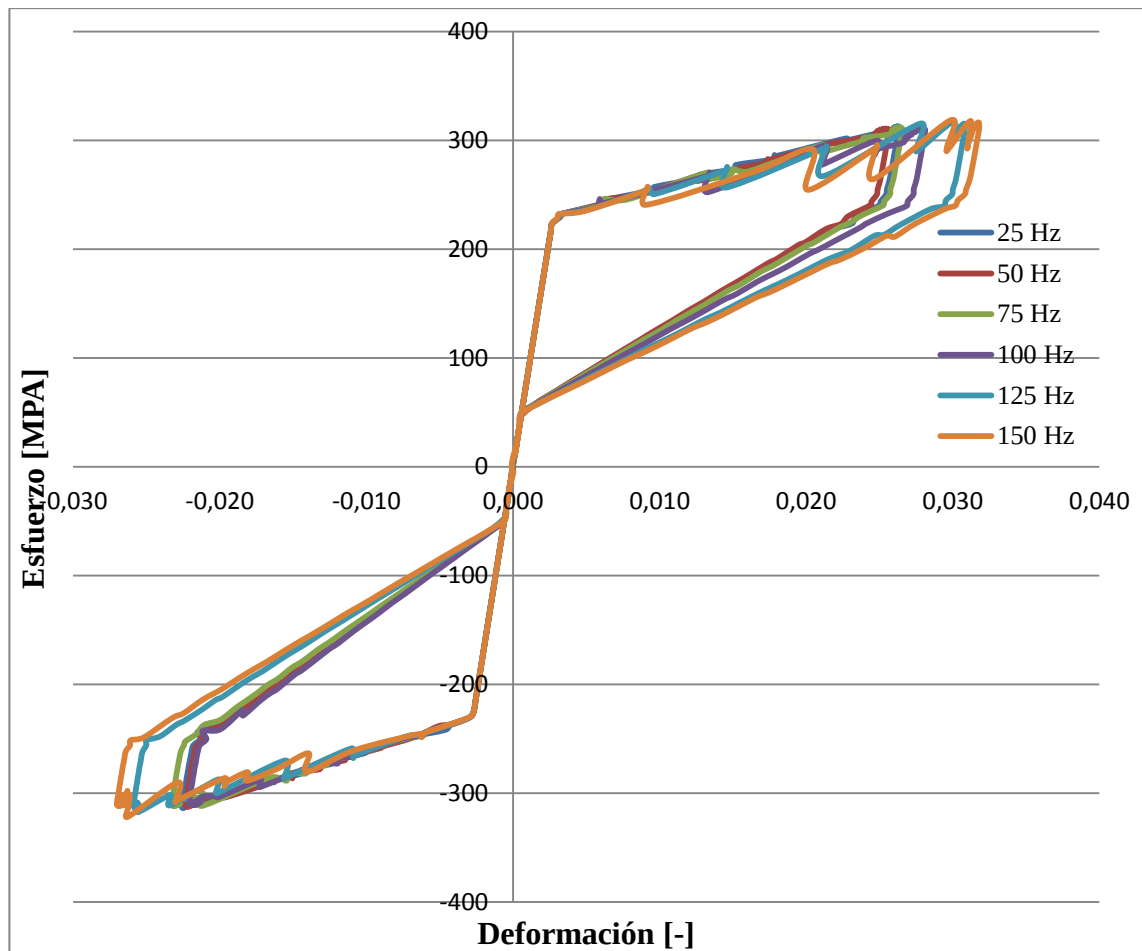


Figura 69: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta maciza.

6.2.2 Probeta con 29,74% de porosidad.

La Figura 70 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 42 [KN].

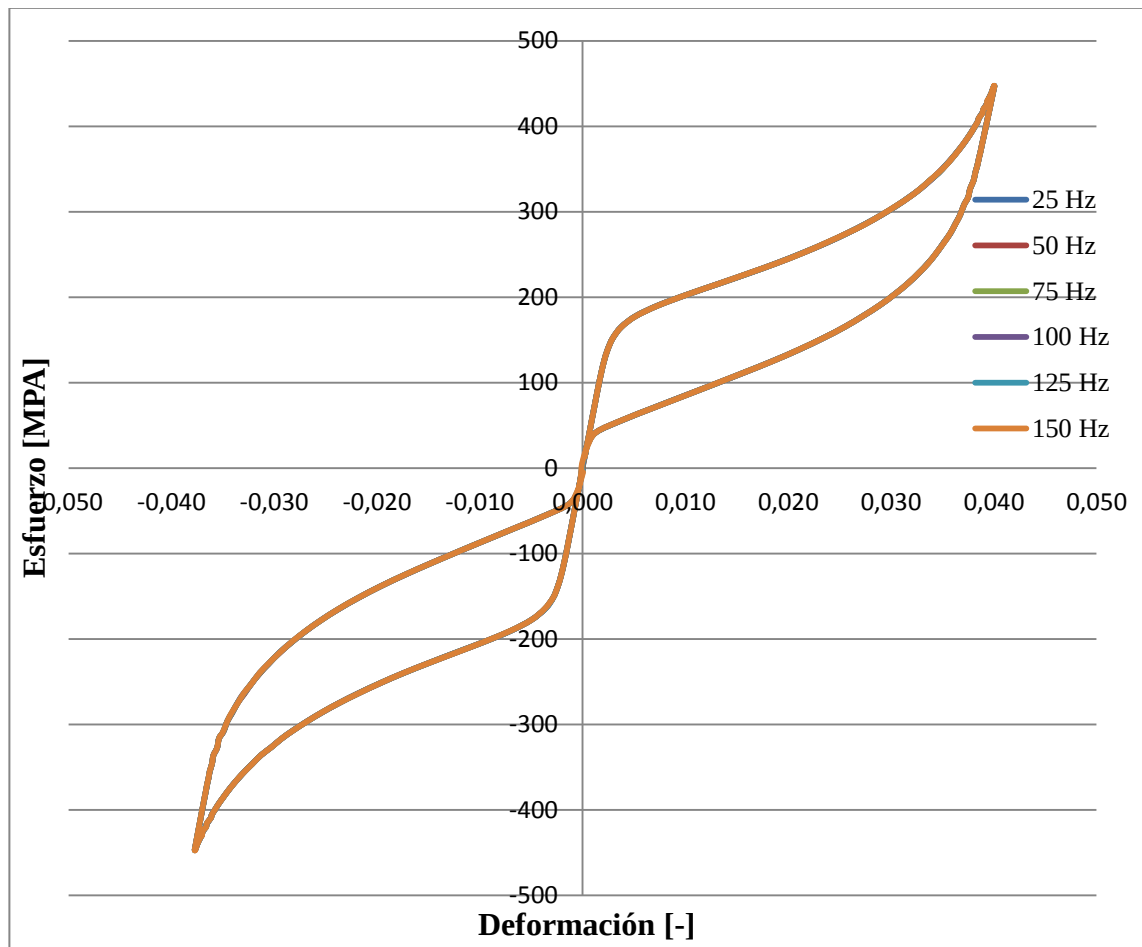


Figura 70: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 29,74 % de porosidad.

6.2.3 Probeta con 31,11 % de porosidad.

La Figura 71 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 42 [KN].

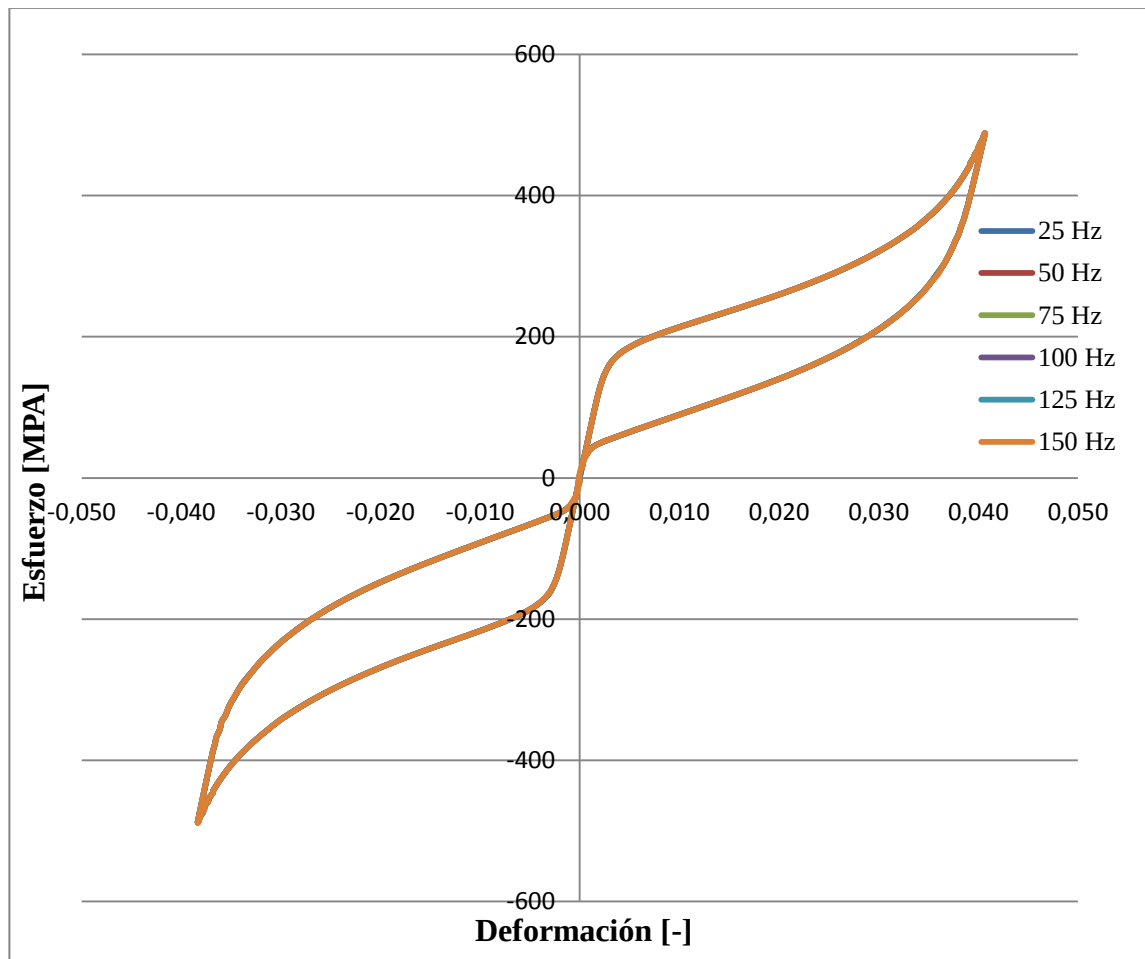


Figura 71: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 31,11 % de porosidad.

6.2.4 Probeta con 32,68 % de porosidad.

La Figura 72 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 42 [KN].

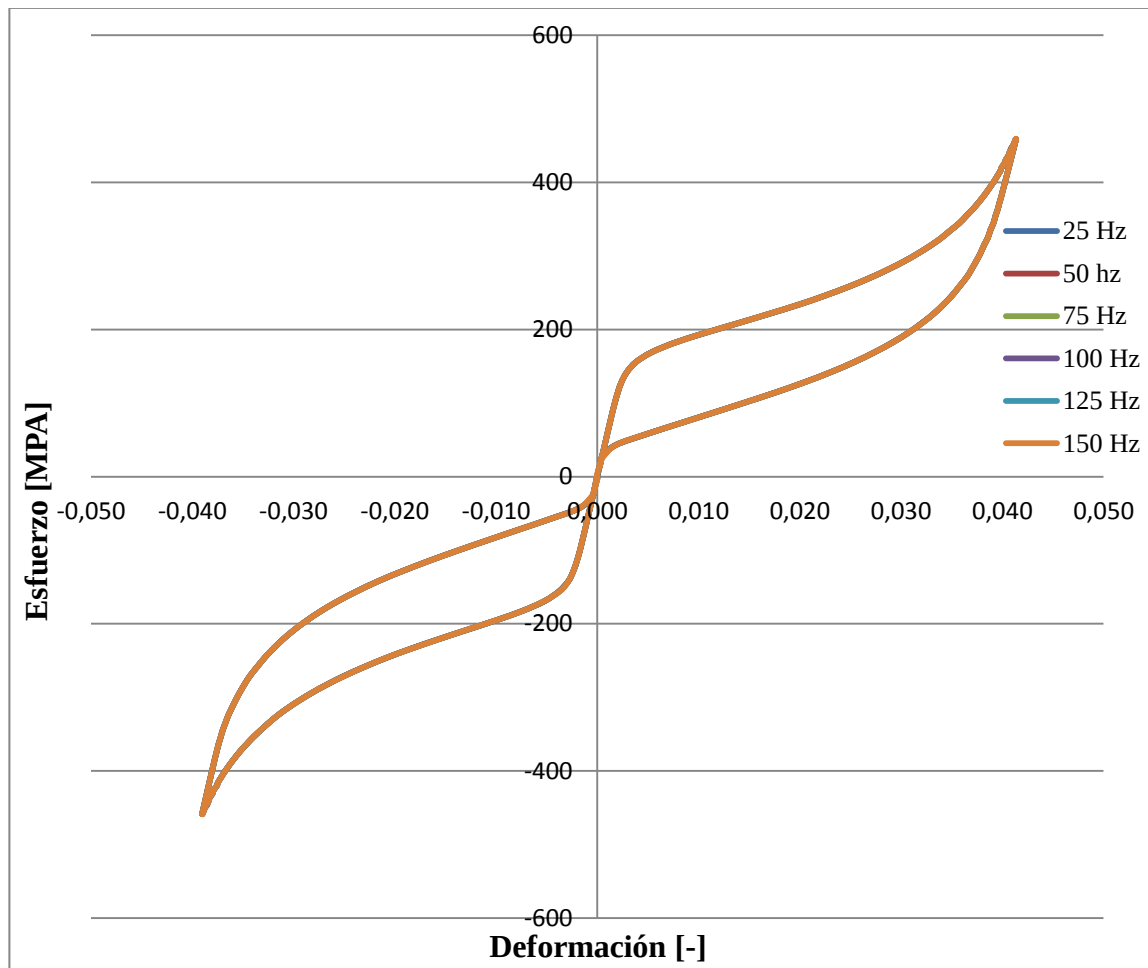


Figura 72: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 32,68 % de porosidad.

6.2.5 Probeta con 39,93 % de porosidad.

La Figura 73 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 42 [KN].

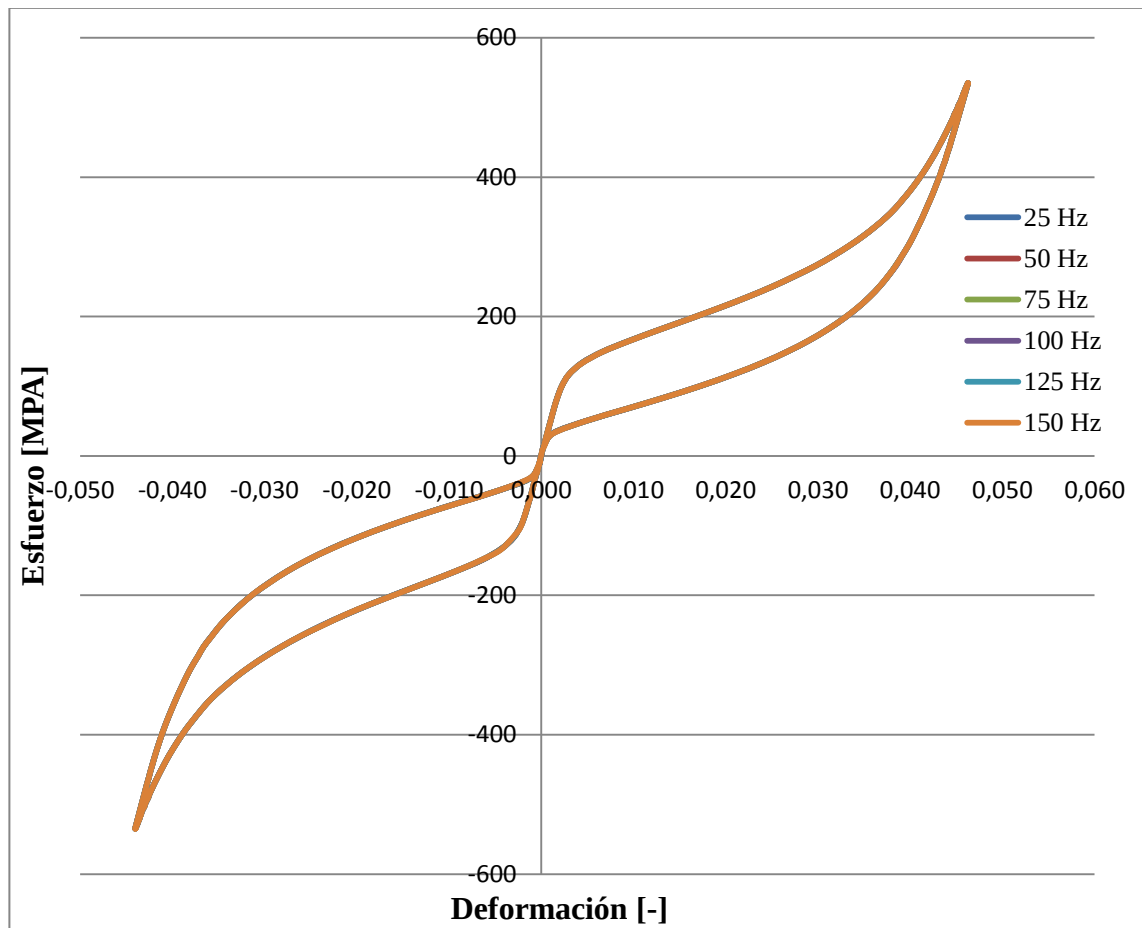


Figura 73: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 39,93 % de porosidad.

6.2.6 Probeta con 51,37 % de porosidad.

La Figura 74 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 42 [KN].

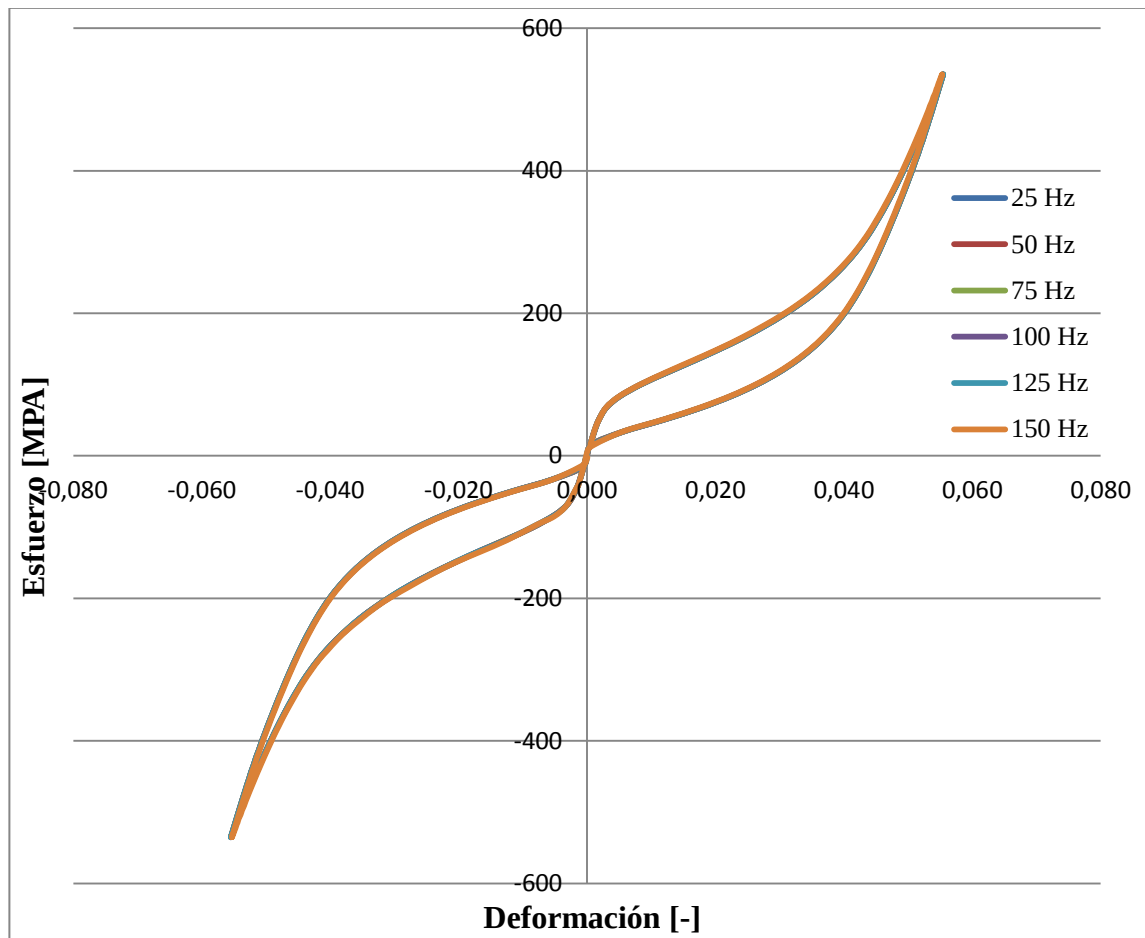


Figura 74: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 51,37 % de porosidad.

6.3 Amplitud de 39 [KN]

6.3.1 Probeta maciza.

La Figura 75 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 39 [KN].

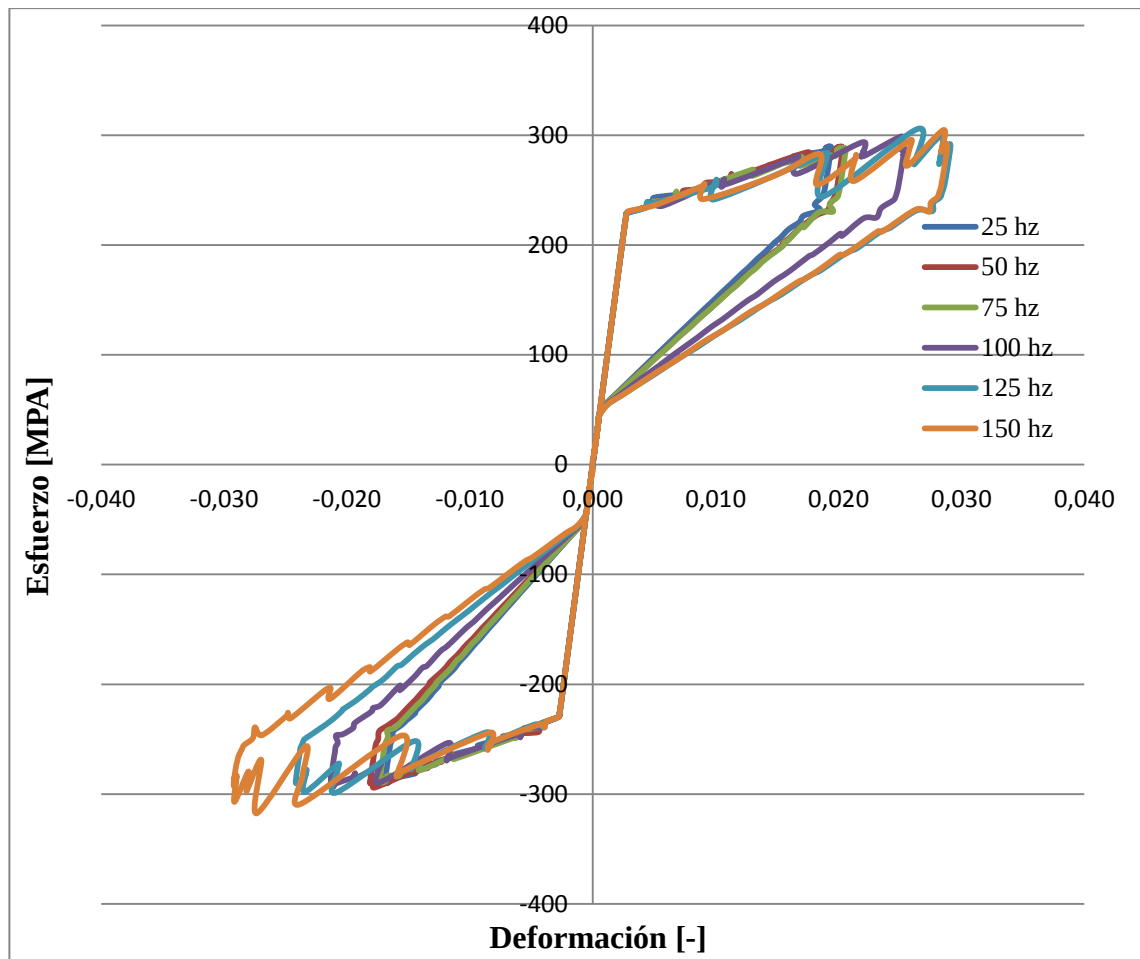


Figura 75: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta maciza.

6.3.2 Probeta con 29,74% de porosidad.

La Figura 76 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 39 [KN].

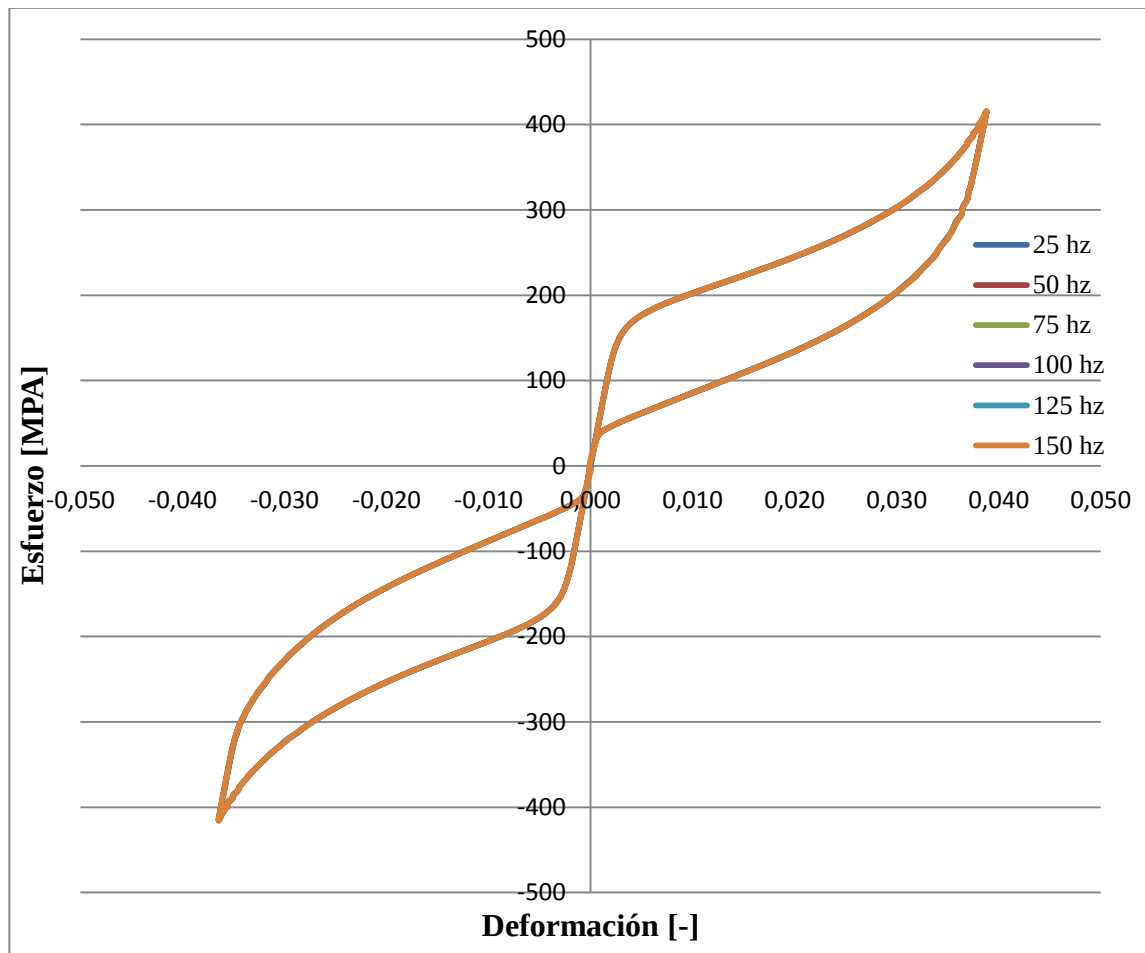


Figura 76: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 29,74 % de porosidad.

6.3.3 Probeta con 31,11 % de porosidad.

La Figura 77 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 39 [KN].

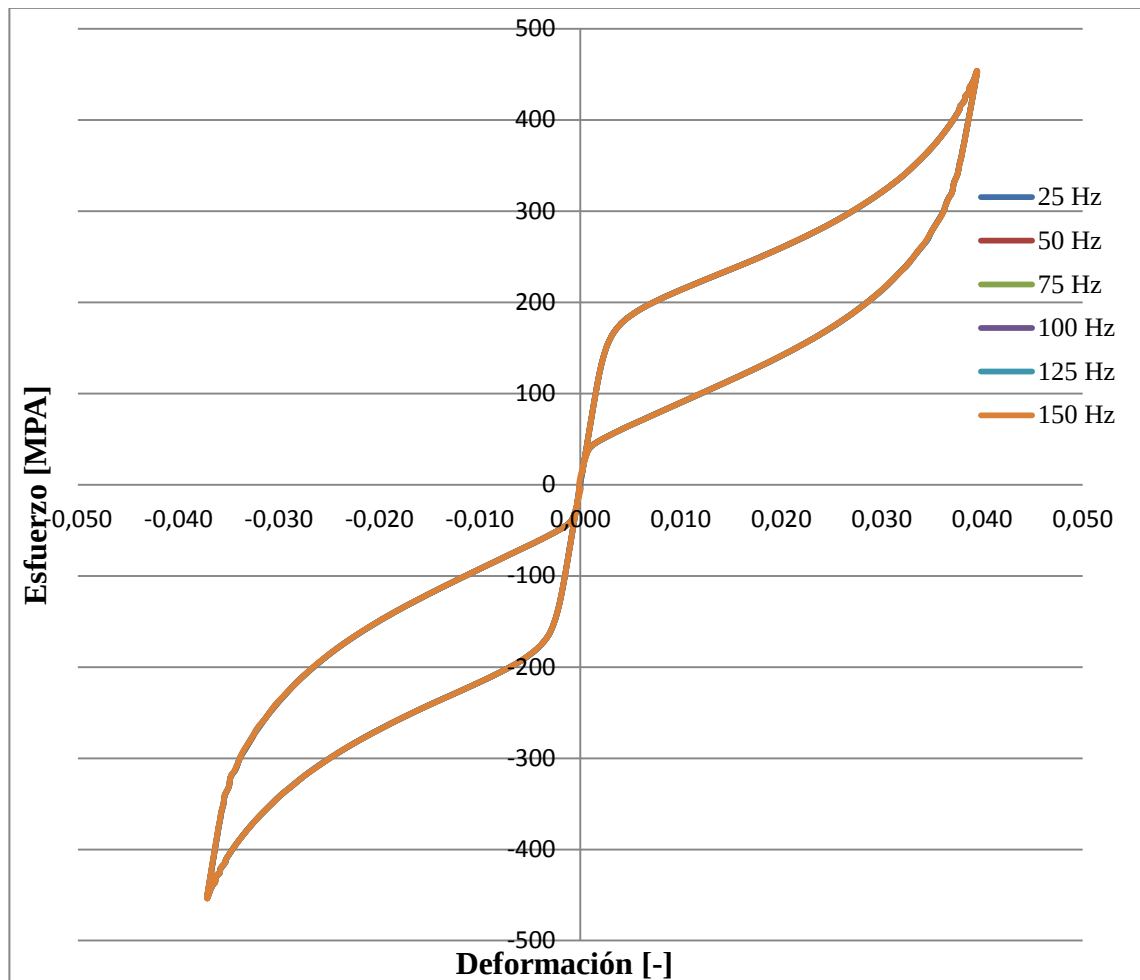


Figura 77: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 31,11 % de porosidad.

6.3.4 Probeta con 32,68 % de porosidad.

La Figura 78 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 39 [KN].

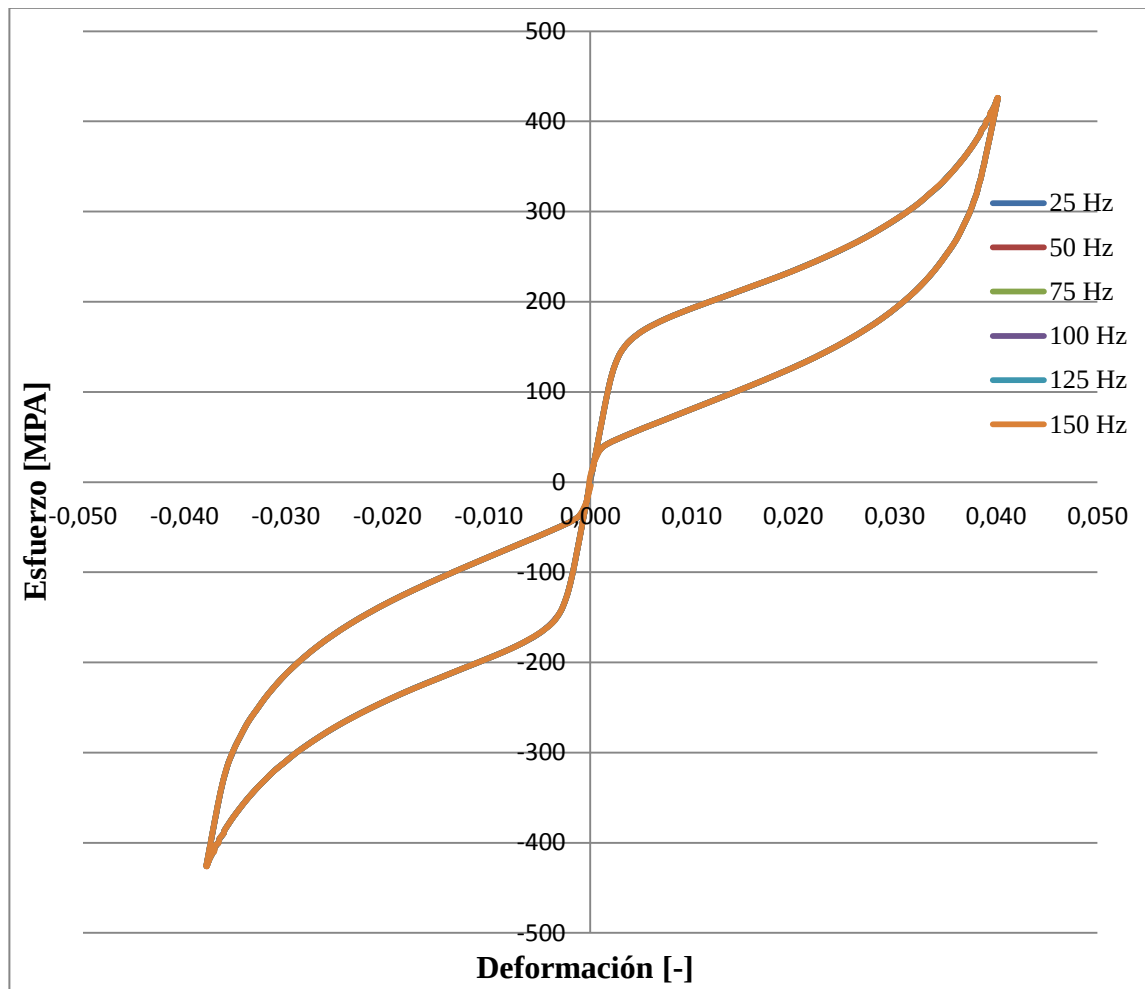


Figura 78: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 32,68 % de porosidad.

6.3.5 Probeta con 39,93 % de porosidad.

La Figura 79 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 39 [KN].

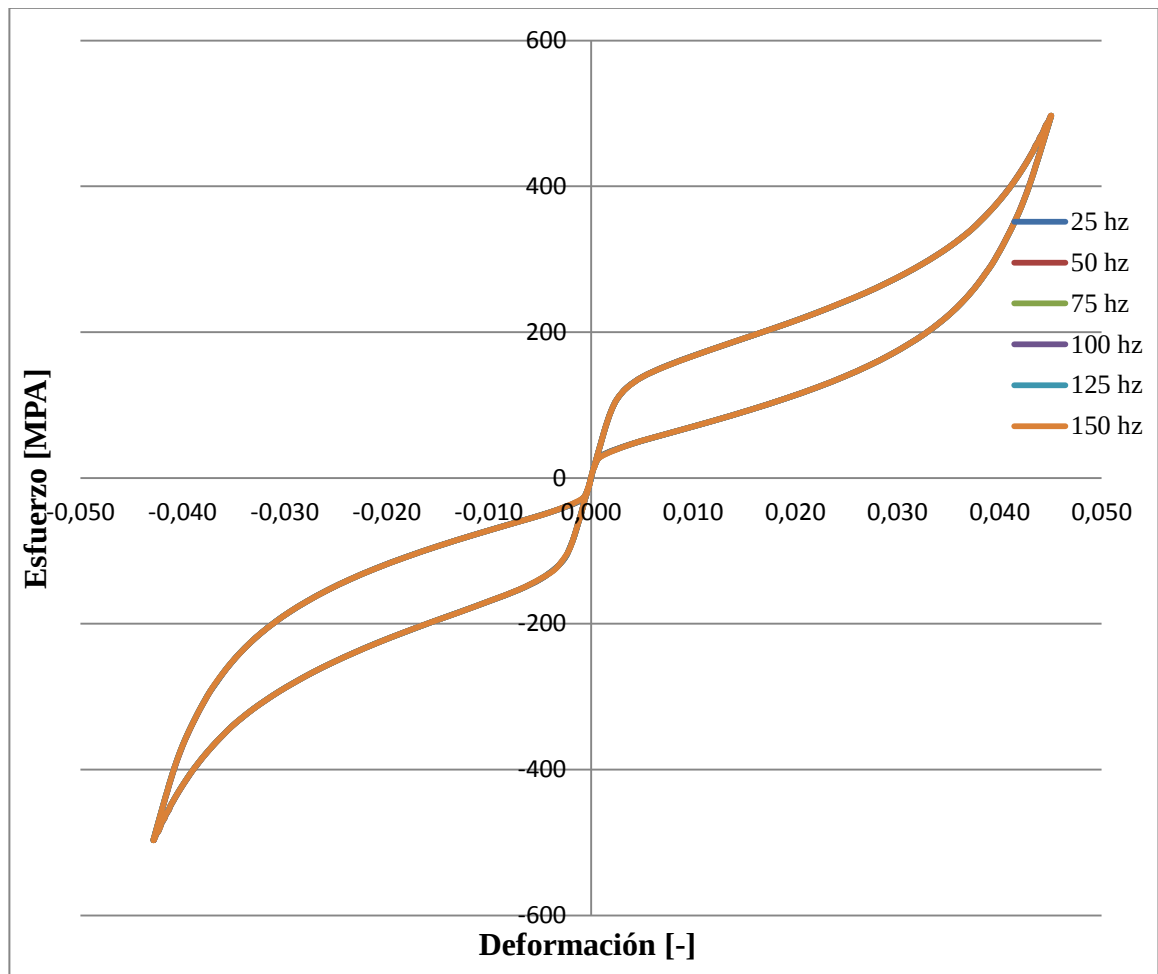


Figura 79: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 39,93 % de porosidad.

6.3.6 Probeta con 51,37 % de porosidad.

La Figura 80 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 39 [KN].

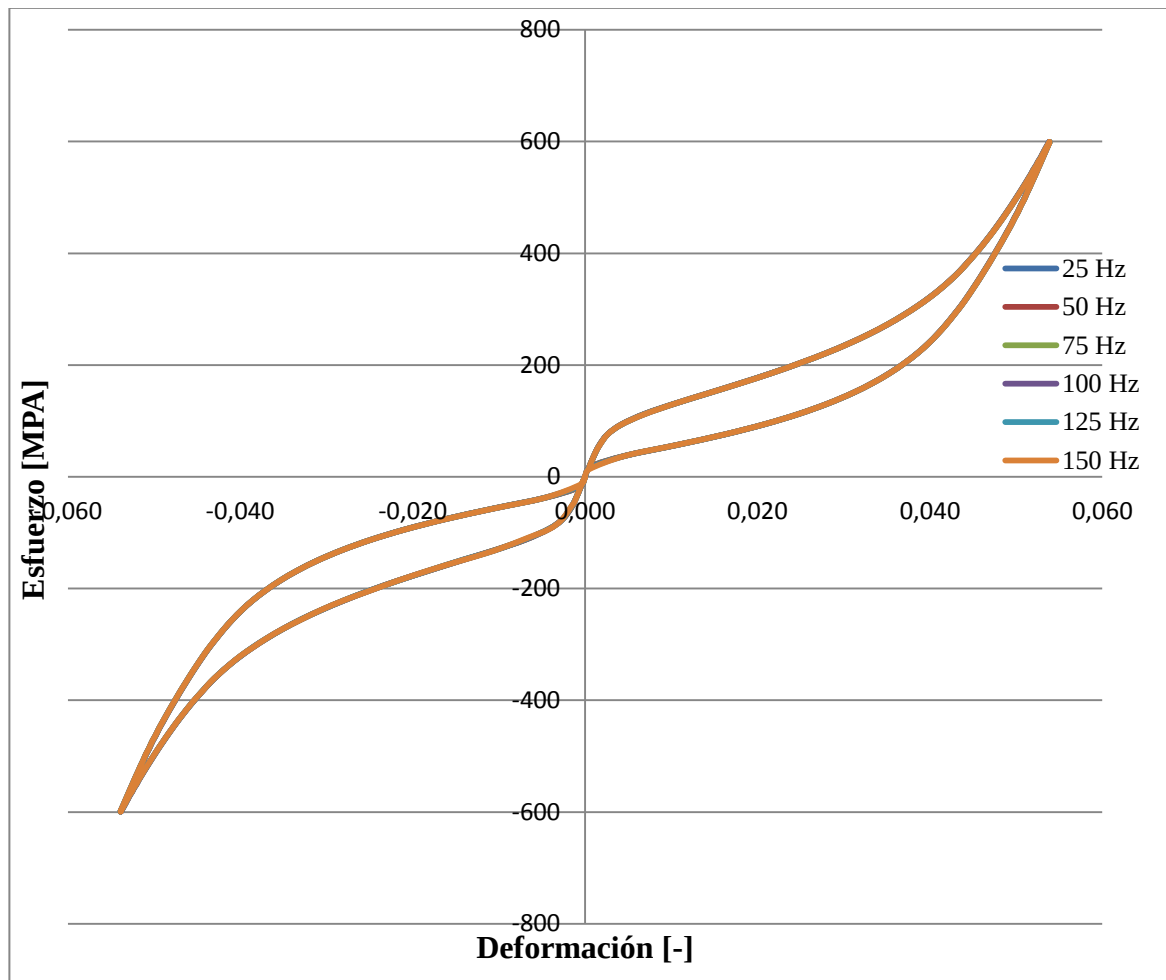


Figura 80: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 51,37 % de porosidad.

6.4 Amplitud de 36 [KN]

6.4.1 Probeta maciza.

La Figura 81 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 36 [KN].

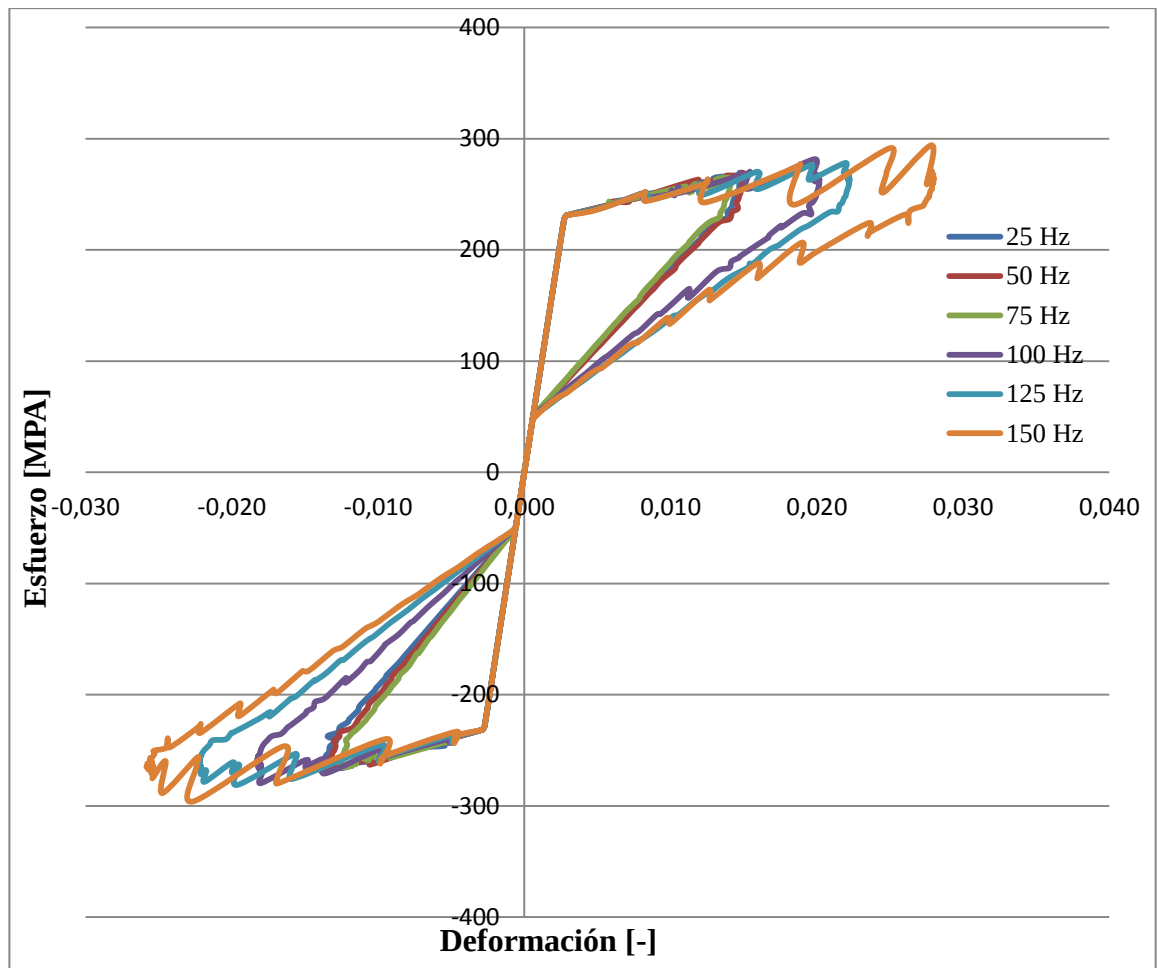


Figura 81: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta maciza.

6.4.2 Probeta con 29,74% de porosidad.

La Figura 82 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 36 [KN].

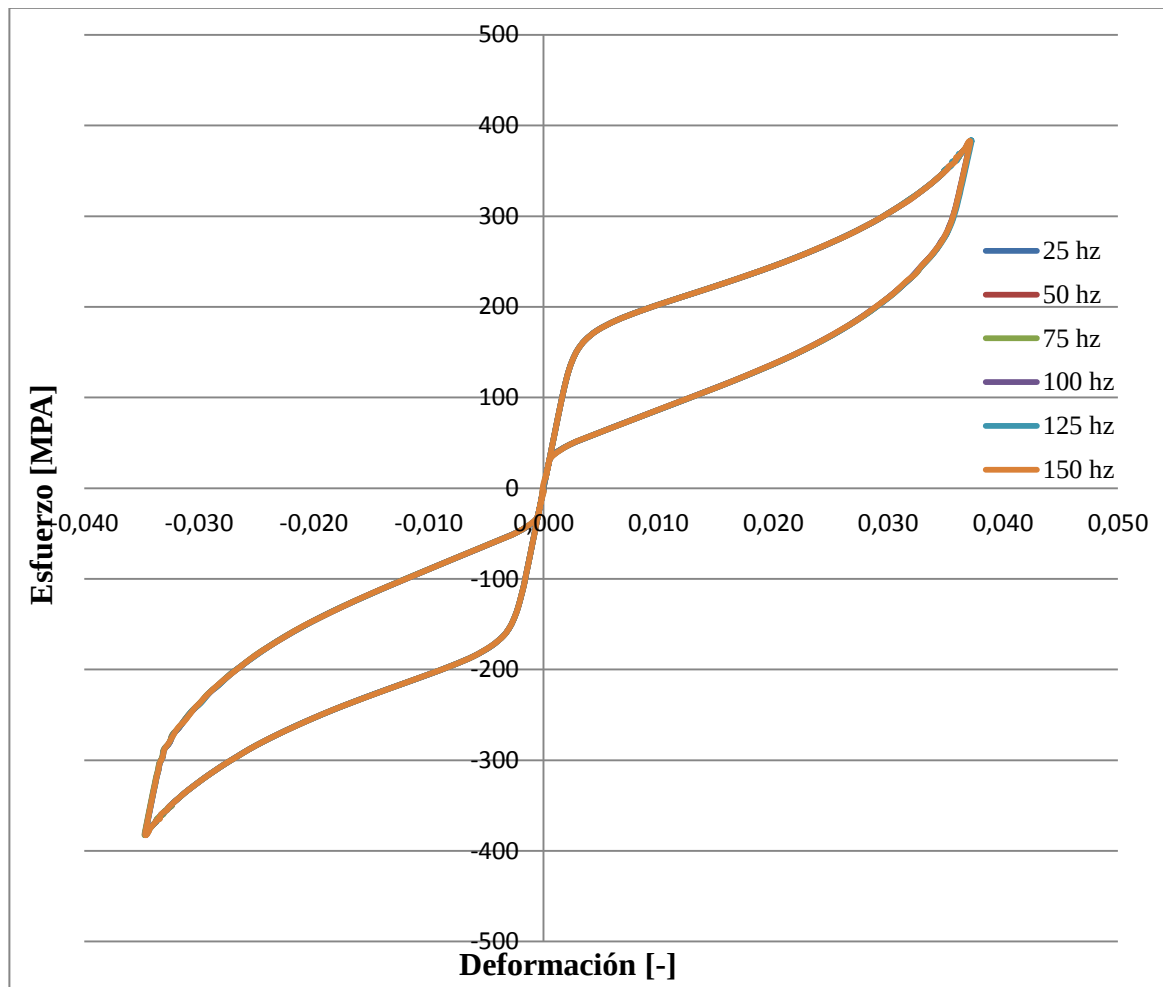


Figura 82: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 29,74% de porosidad.

6.4.3 Probeta con 31,11 % de porosidad.

La Figura 83 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 36 [KN].

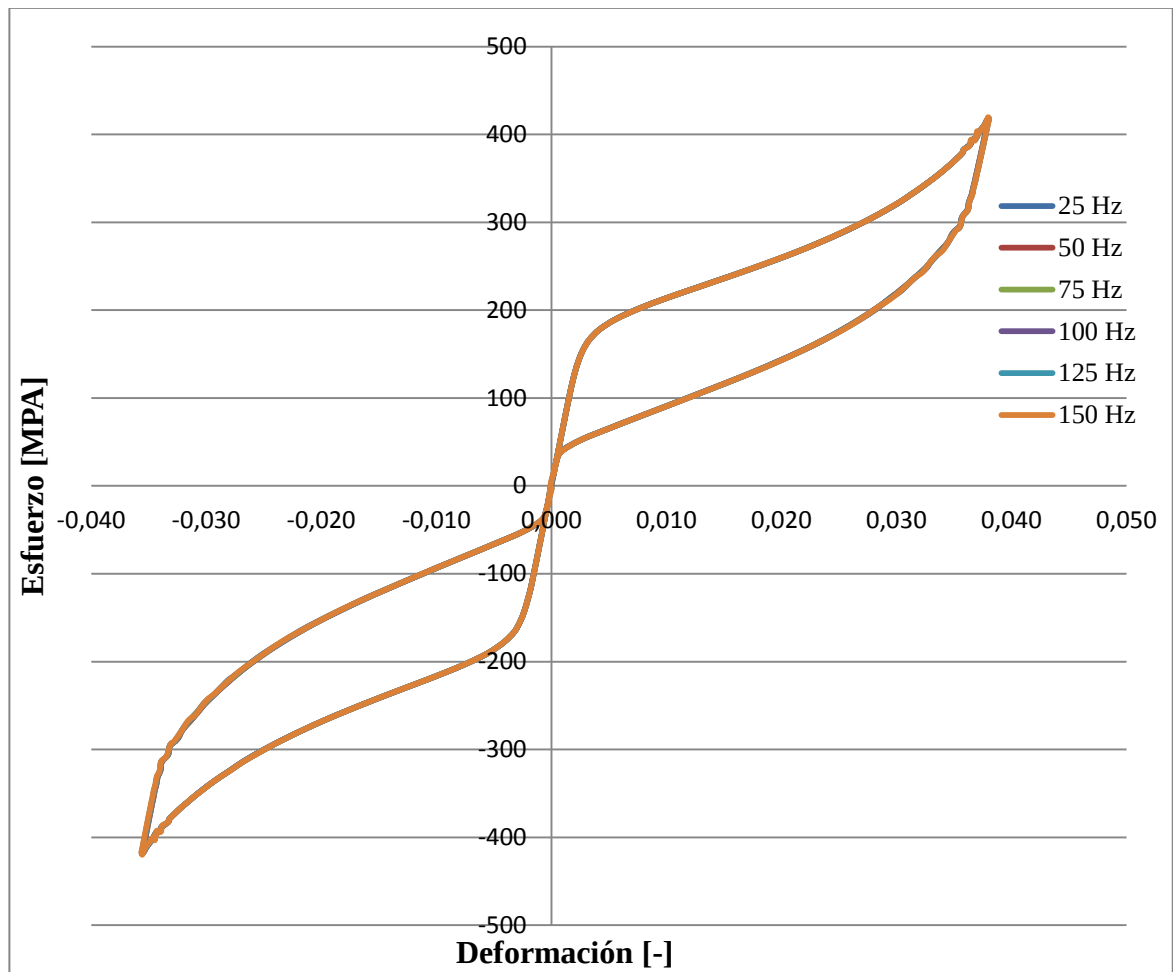


Figura 83: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 31,11% de porosidad.

6.4.4 Probeta con 32,68 % de porosidad.

La Figura 84 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 36 [KN].

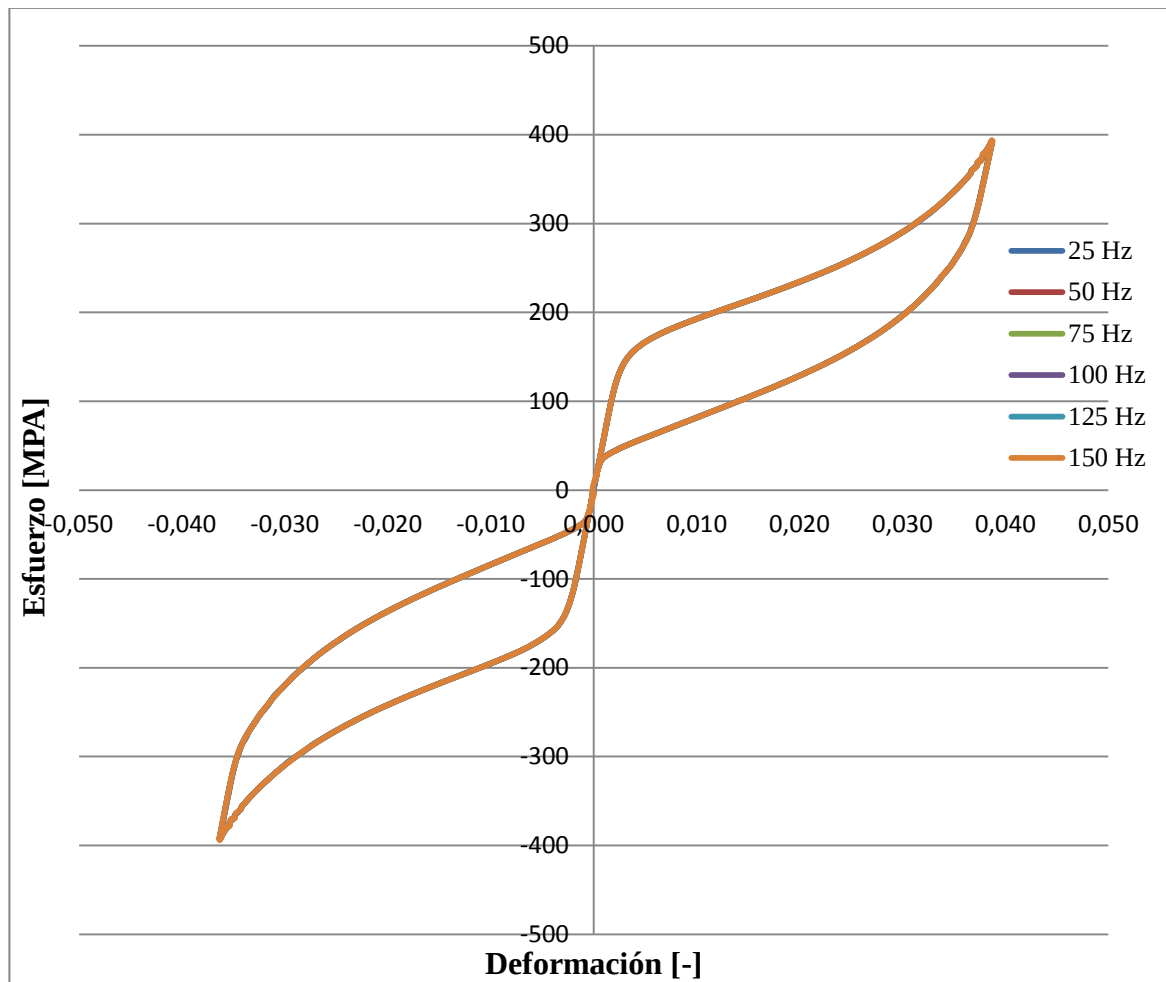


Figura 84: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 32,68% de porosidad.

6.4.5 Probeta con 39,93 % de porosidad.

La Figura 85 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 36 [KN].

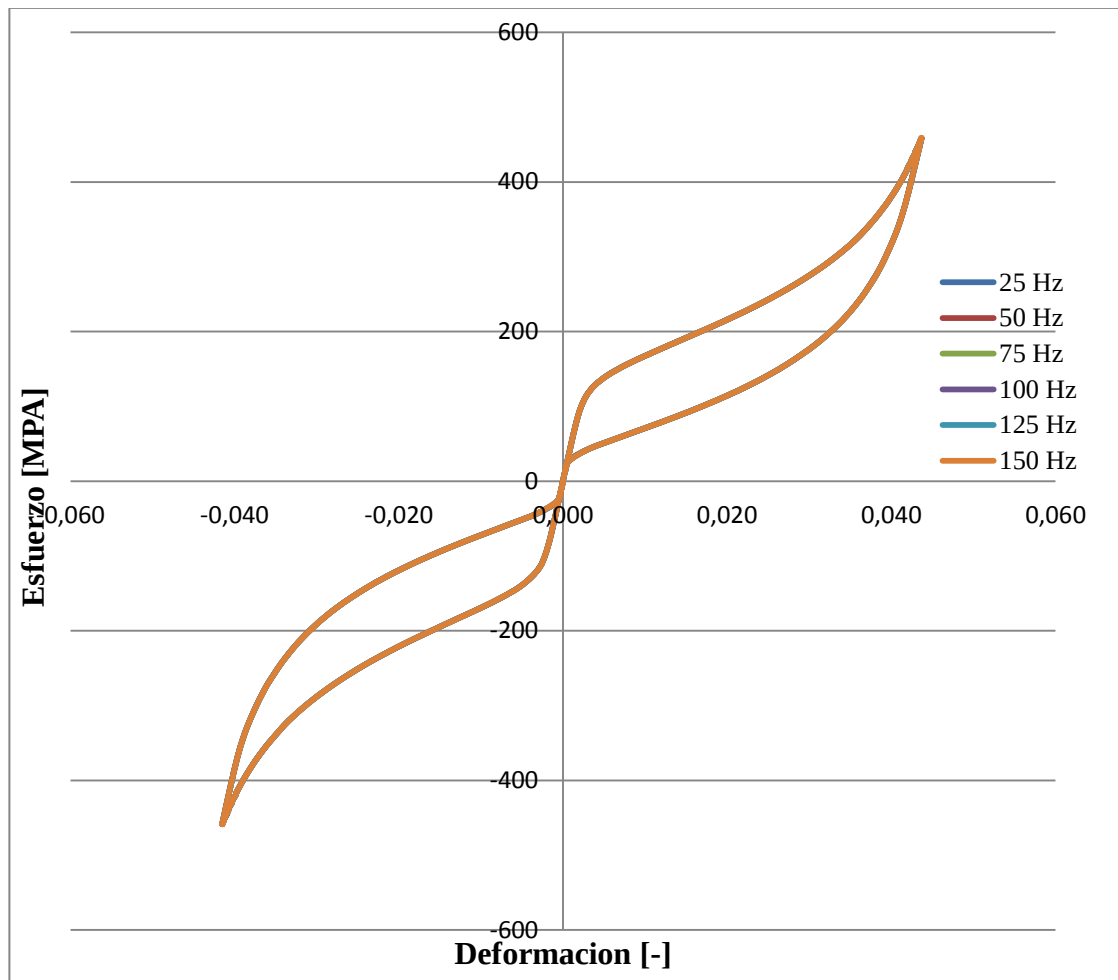


Figura 85: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 39,93% de porosidad.

6.4.6 Probeta con 51,37 % de porosidad.

La Figura 86 muestra la deformación de la probeta al ser sometida a excitaciones armónicas con diferentes frecuencias y una amplitud de 36 [KN].

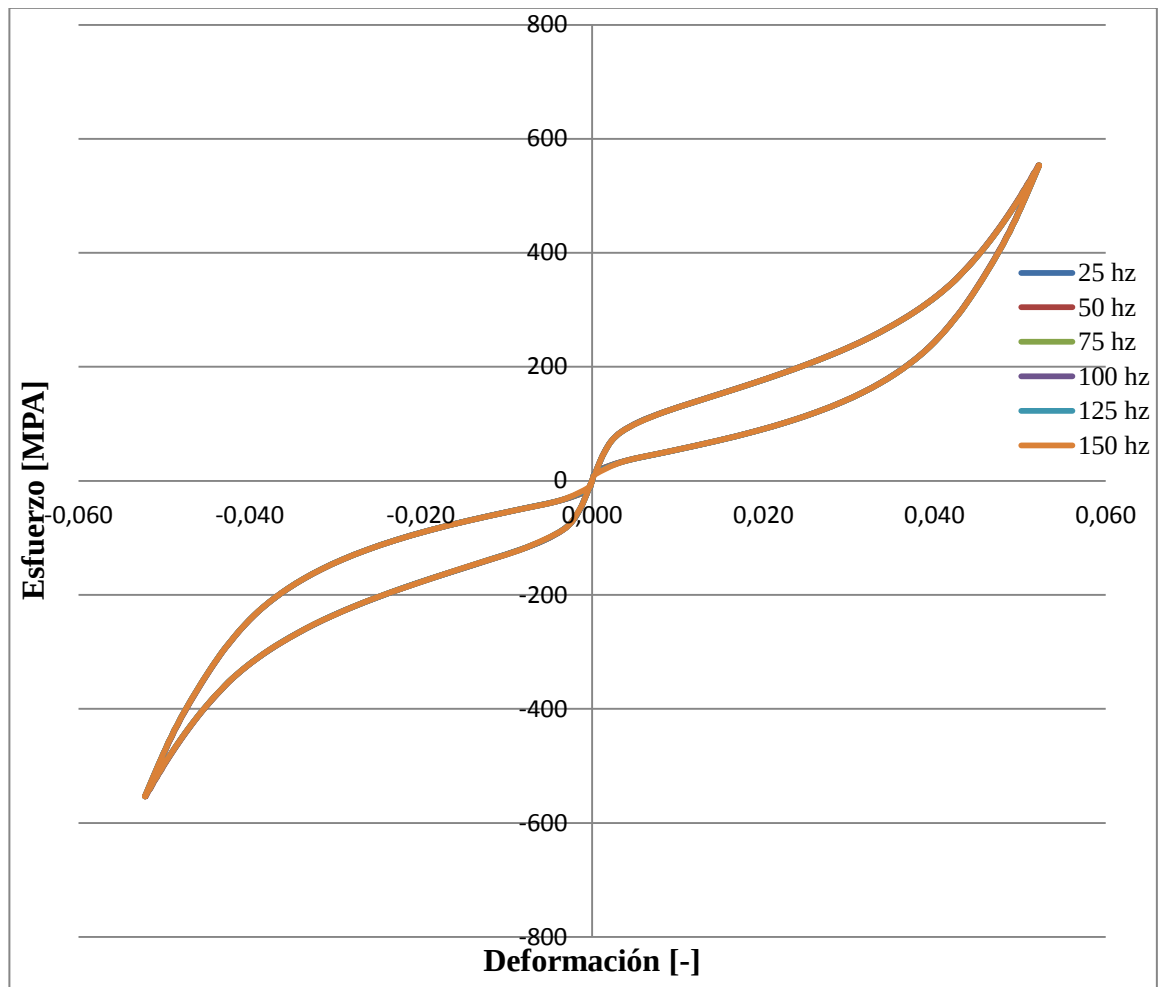


Figura 86: Curvas esfuerzo vs deformación de probeta con 51,37% de porosidad.

7 Análisis de resultados

El análisis de las curvas esfuerzo deformación se aprecia visualmente la diferencia que existe entre los diferentes cálculos MEF para cada probeta con diferente porcentaje de porosidad. Las Figura 87 y 88 se visualiza las diferencia para una amplitud de 45 [KN] con frecuencias de 25 Hz y 125 Hz, las formas de las curvas luego de una carga sinusoidal para la probeta maciza en comparación con las con porosidad son visibles en sus áreas y longitudes, la condición normal de la curva de histéresis en un material CuALBe en el MEF cambia al momento de analizarla con espumas de porosidades diferentes, como se muestra en las gráficas.

EL comportamiento que se ve en las gráficas para las amplitudes de 45 KN, 42 KN, 39 KN y 36 KN tienen una tendencia similar en su forma para las probetas con porosidades distintas, esto implica que las probetas se comportan de manera similar producto de una excitación armónica.

Este trabajo experimenta el análisis de vibraciones en la capacidad de amortiguamiento de las probetas con porosidad o también conocidas como medios porosos, la energía absorbida en las vibraciones se define por el cálculo del área de histéresis, a su vez, la capacidad de amortiguamiento de los modelos es el factor de pérdida (η) que arroja las diferentes pruebas ejecutadas, por otro lado, se estudia las deformaciones generadas en compresión y los niveles máximos de desplazamientos causados en los medios porosos. Se analiza la respuesta del módulo de Young en la primera etapa de tracción en la modelación, para los diferentes modelos con porosidad. Las variaciones de todos estos parámetros producto de la amplitud de la vibración y su frecuencia de excitación, son de interés a desarrollar.

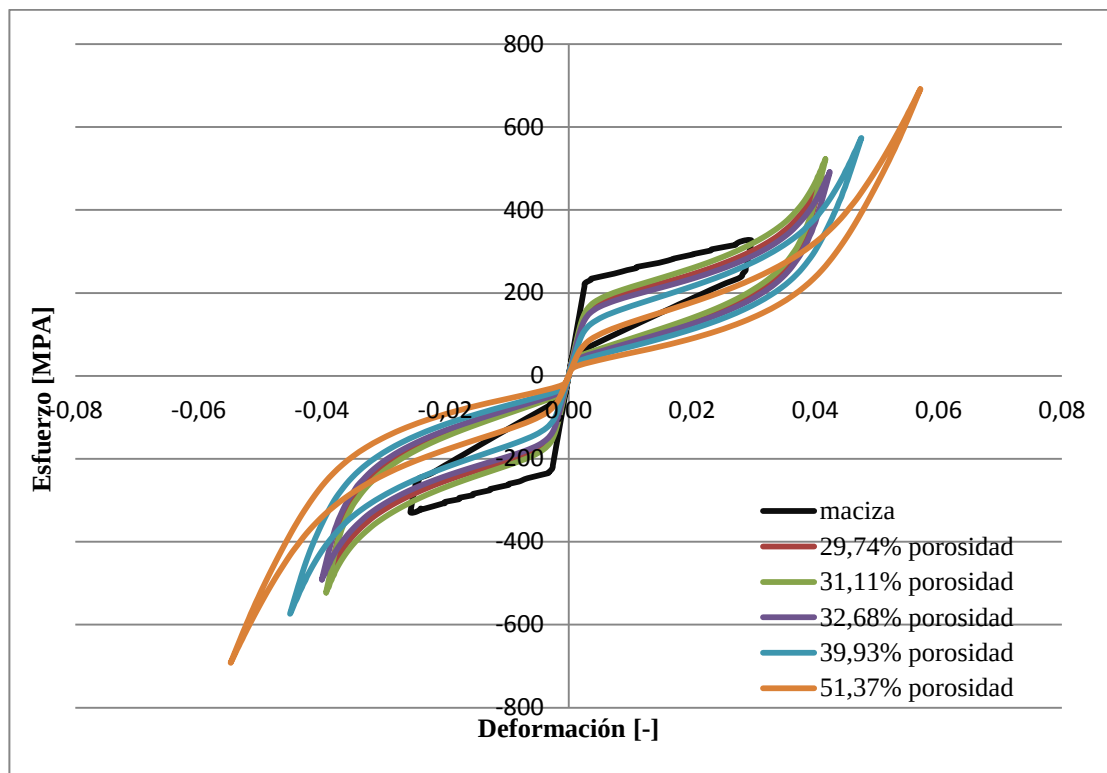


Figura 87: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 45 [KN] y 25 Hz en diferentes % porosidad.

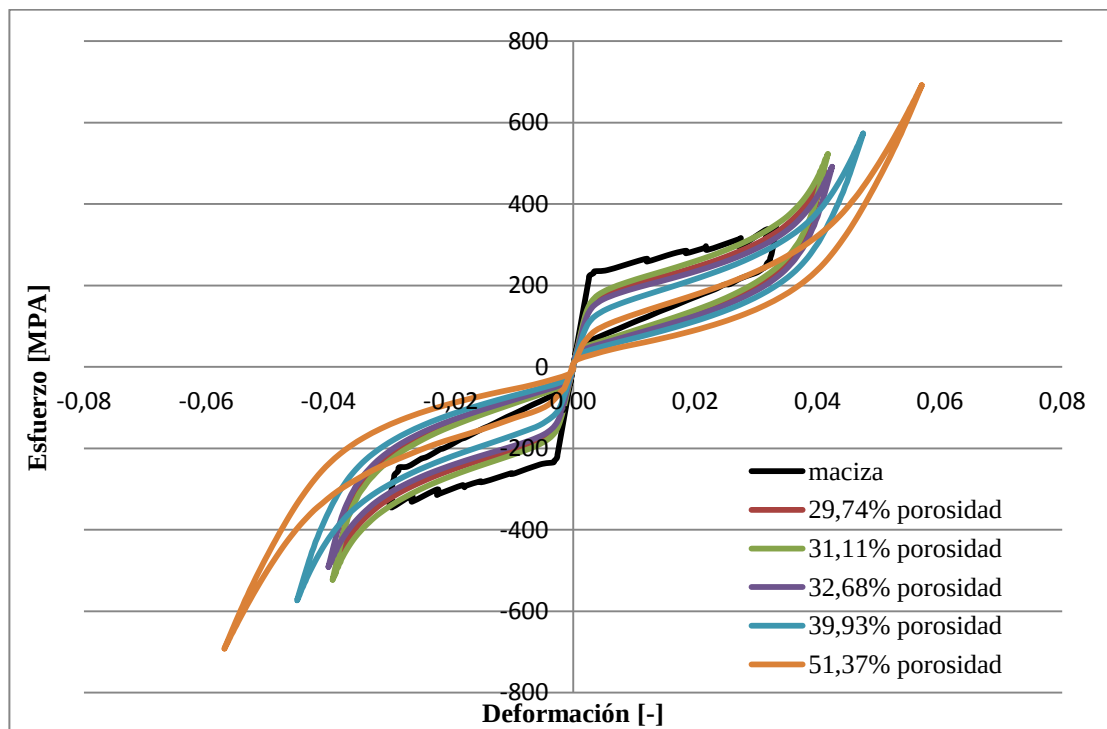


Figura 88: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 45 [KN] y 125 Hz en diferentes % porosidad.

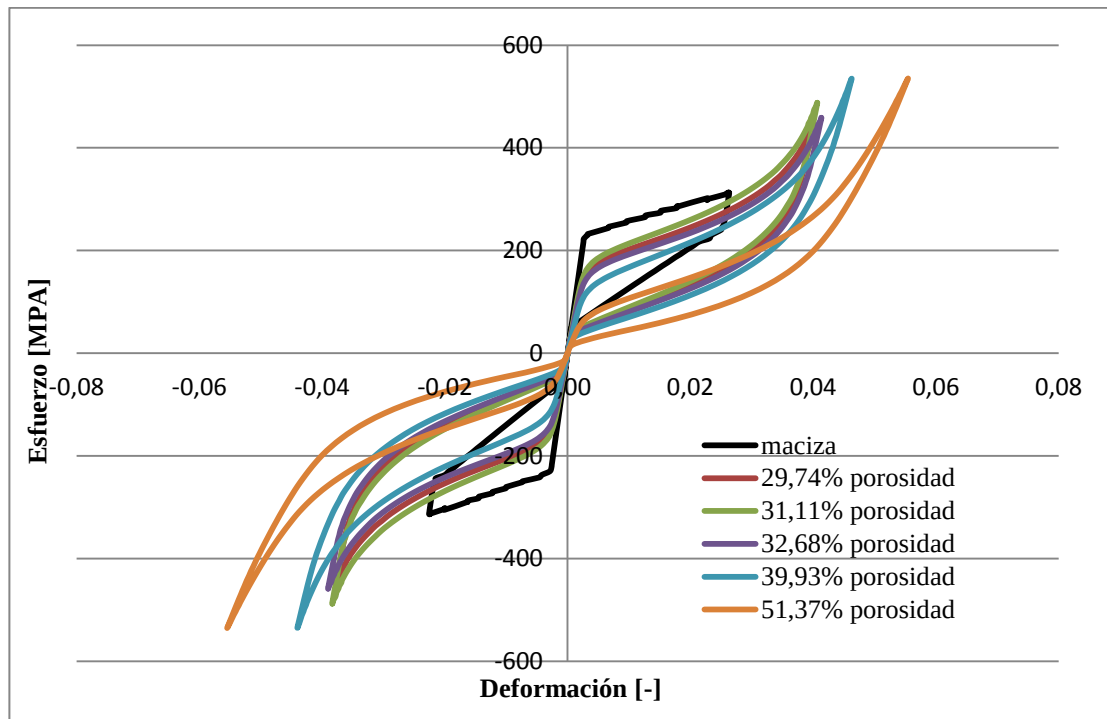


Figura 89: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 42 [kN] y 25 Hz en diferentes % porosidad

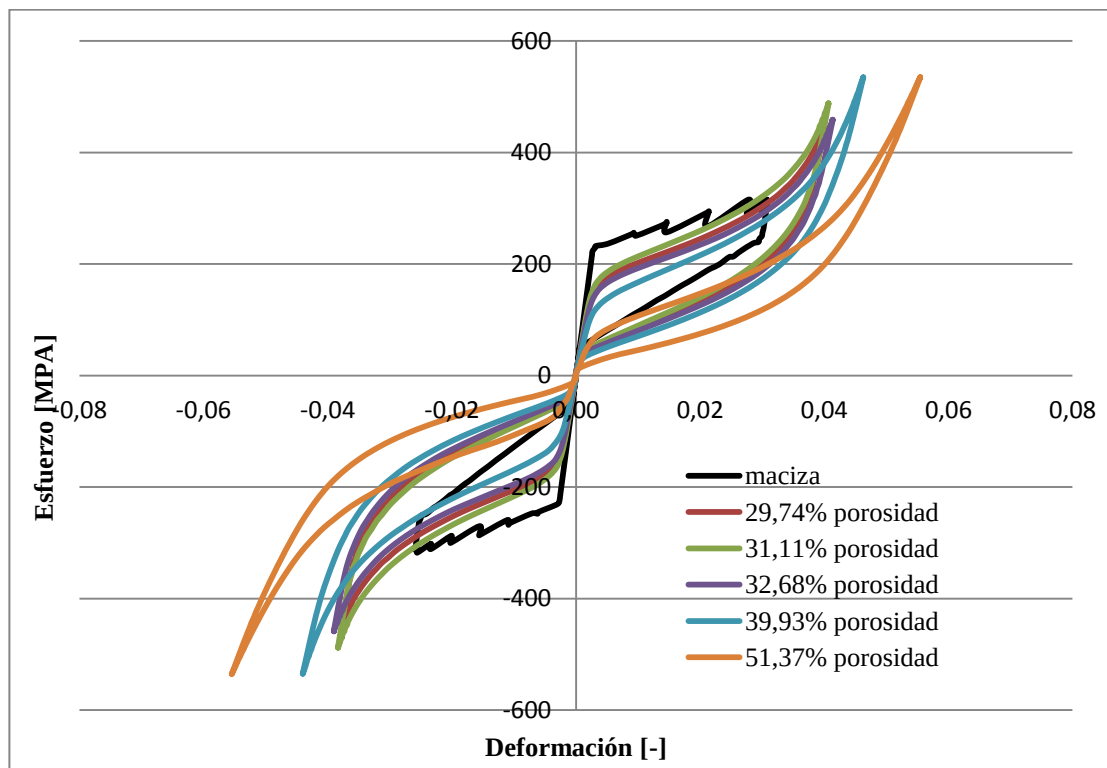


Figura 90: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 42 [kN] y 125 Hz en diferentes % porosidad.

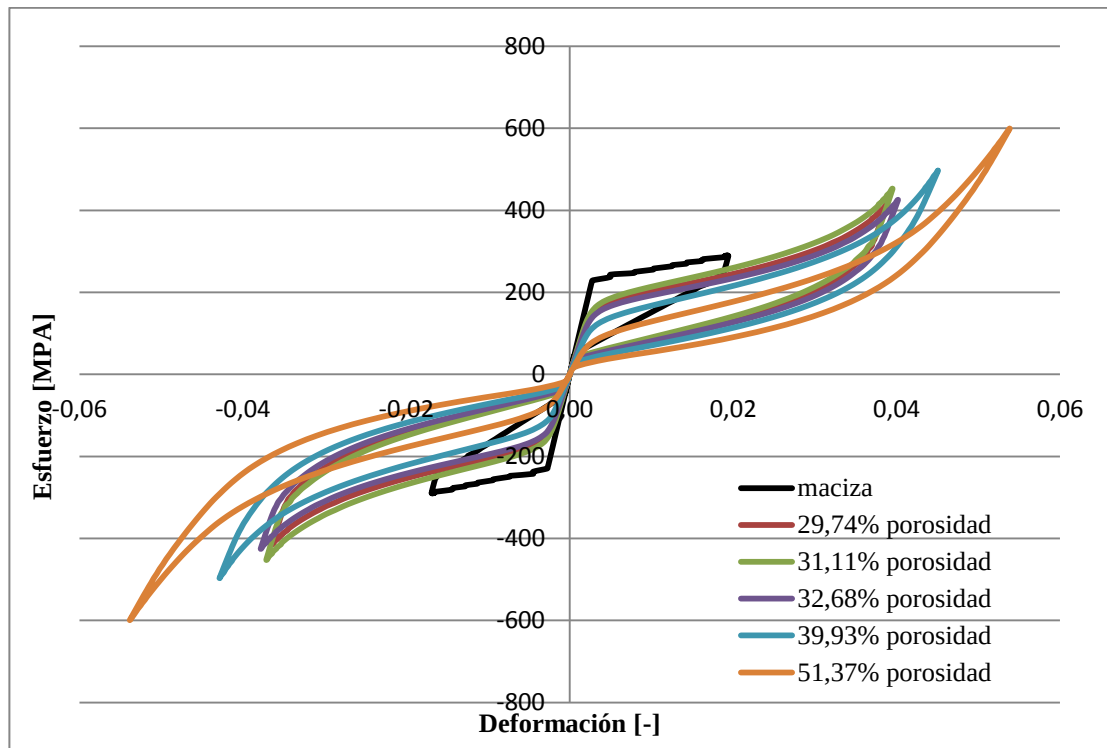


Figura 91: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 39 [KN] y 25 Hz en diferentes % porosidad.

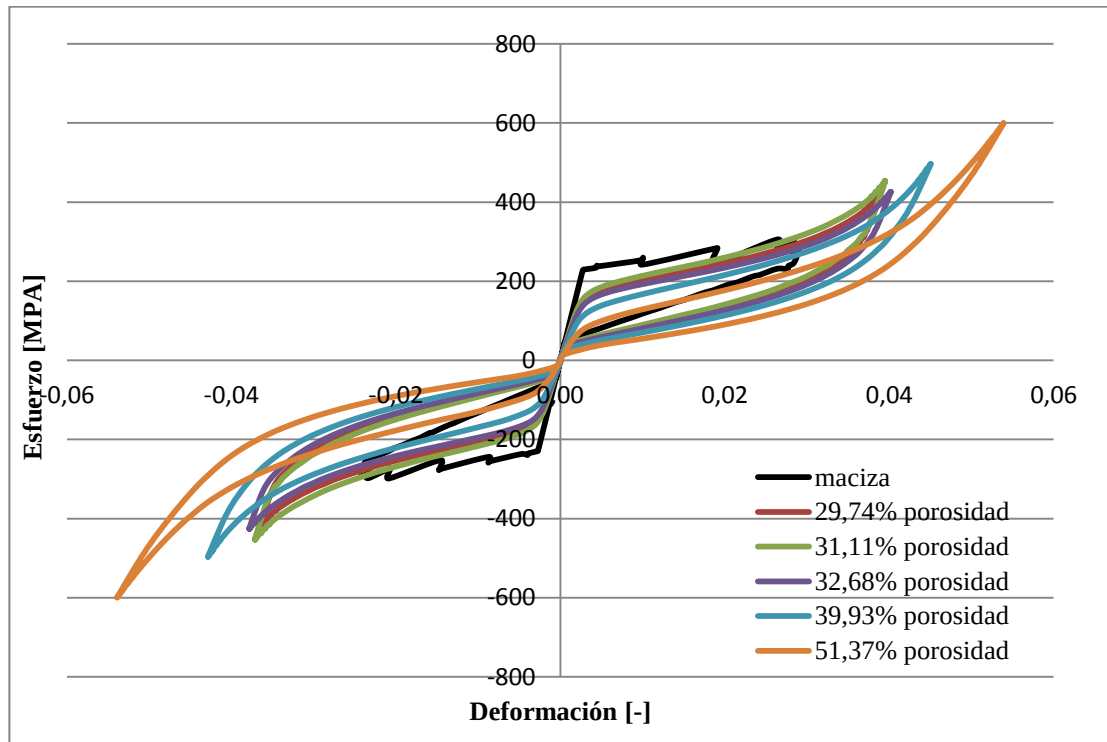


Figura 92: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 39 [KN] y 125 Hz en diferentes % porosidad.

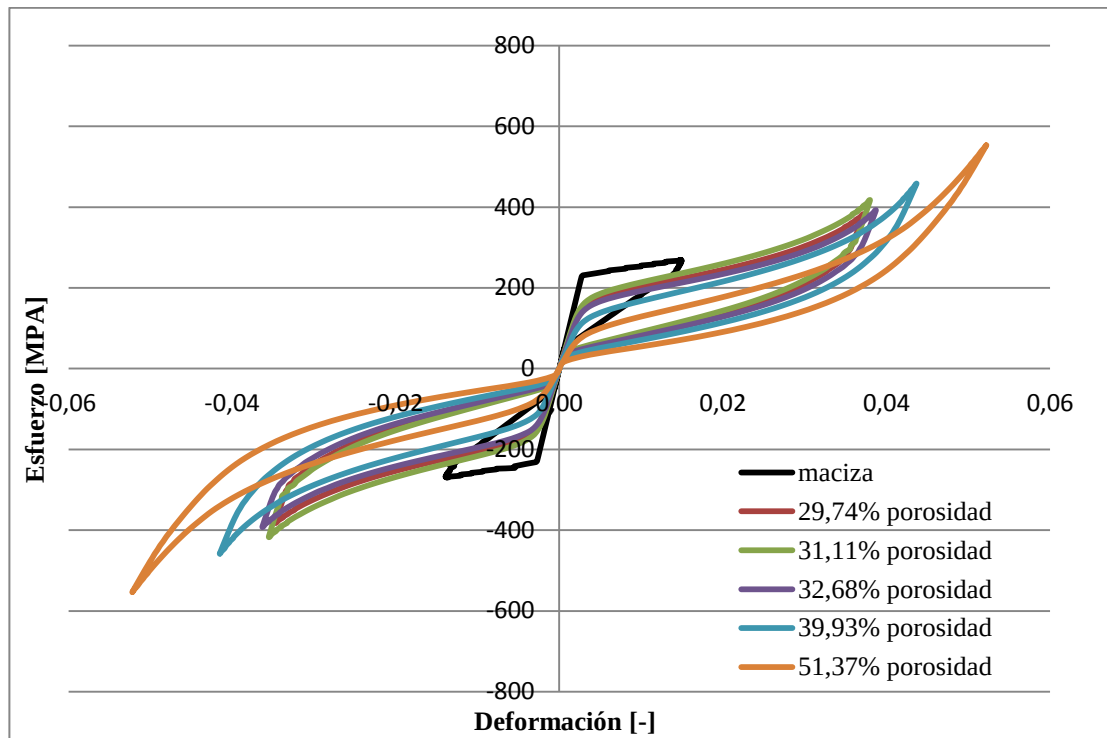


Figura 93: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 36 [kN] y 25 Hz en diferentes % porosidad.

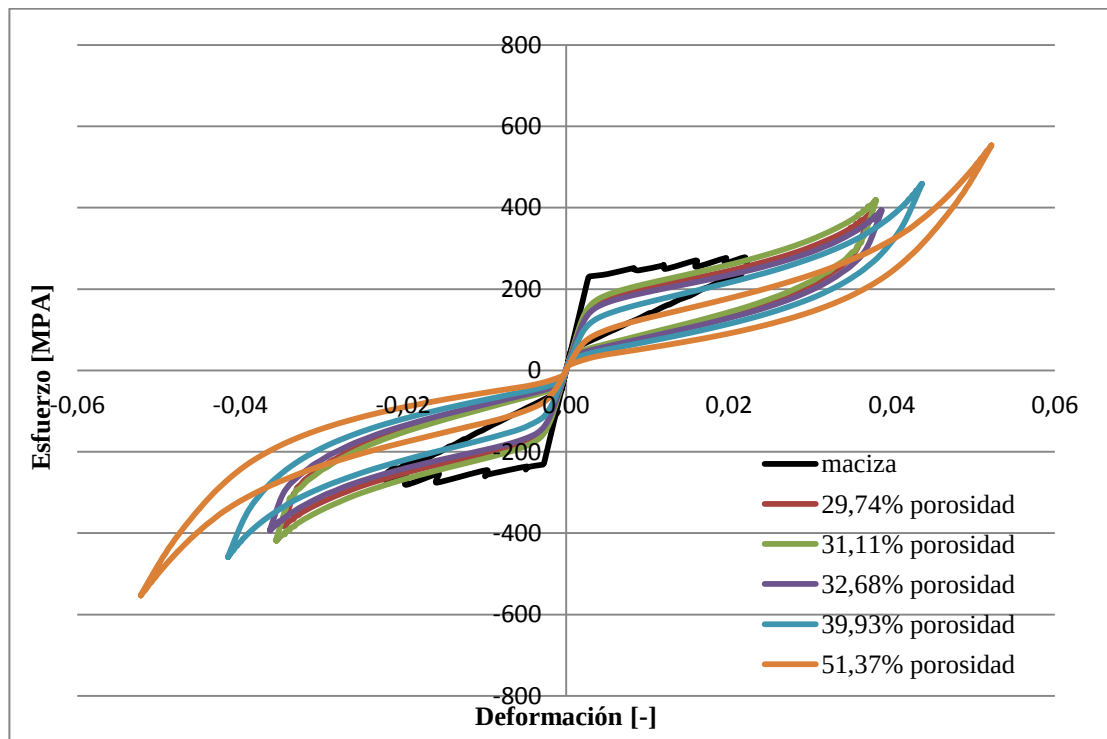


Figura 94: Gráfica σ vs ϵ , amplitud 36 [kN] y 125 Hz en diferentes % porosidad.

7.1 Variación del Área de histéresis en las probetas con porosidad.

El área de histéresis equivale a la energía disipada en cada ciclo de vibración, el análisis se divide para cada fuerza de amplitud aplicada.

La Figura 95 detalla la variación del área de histéresis o energía disipada en cada ciclo de vibración en las frecuencias evaluadas con una amplitud de 45 KN, las probetas con porosidad al compararlas con una maciza arrojan una mayor energía de disipación, siendo la mayor diferencia a 25 Hz, en donde la probeta 31,11% de porosidad tiene una diferencia de la energía absorbida de un 23,5 % mayor en comparación con la sin porosidad.

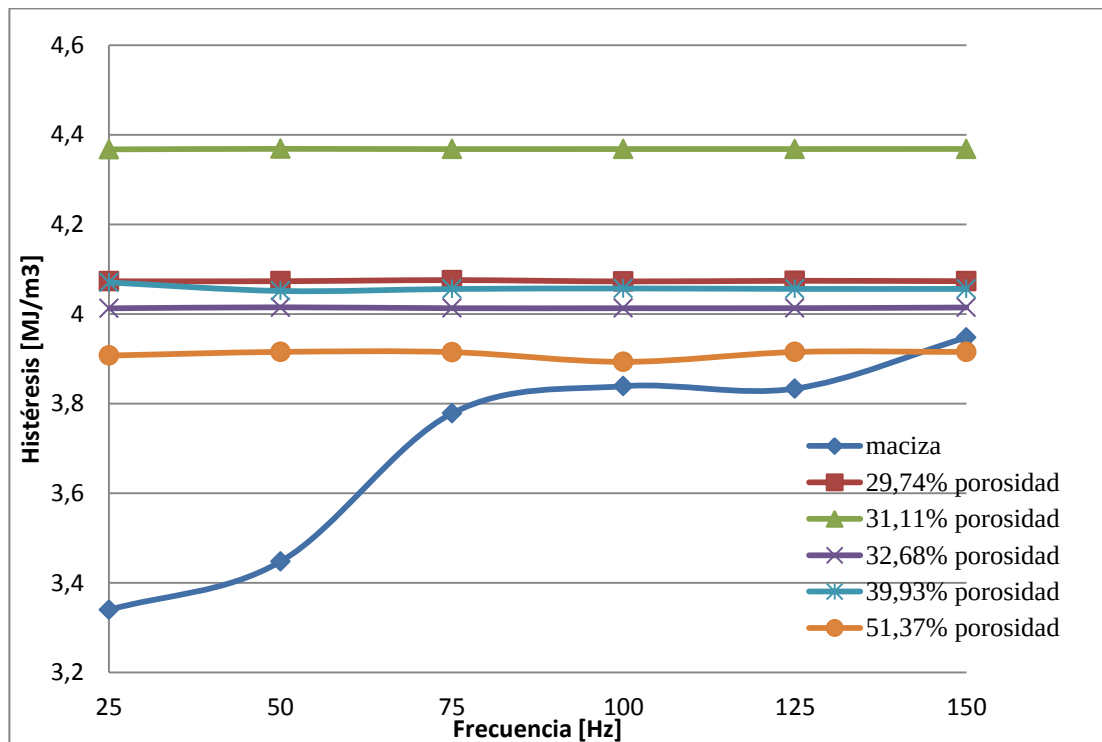


Figura 95: Área de histéresis variando la frecuencia con una amplitud de 45 KN en cada probeta.

El comportamiento de la energía disipada en la probeta maciza crece al momento de elevar la frecuencia de excitación, donde la diferencia entre la energía a 25 Hz en comparación con la de 150 Hz es del 15,4 %, por el contrario, las probetas con porosidad tiene un comportamiento similar, es decir la energía disipada en una probeta con poros no varía de manera significativa al momento de cambiar la frecuencia de excitación aplicada.

Las Figuras 96, 97 y 98 muestran el comportamiento de la energía disipada para los tres ensayos modelados con las fuerzas de amplitud de 42 [KN], 39 [KN] y 36 [KN] respectivamente. Las gráficas muestran que la tendencia sigue siendo la misma al variar las fuerzas de excitación. La máxima disipación de energía se muestra en la Figura 95 para la probeta con 31,11% de porosidad con una disipación de 4,36 [MJ/m³].

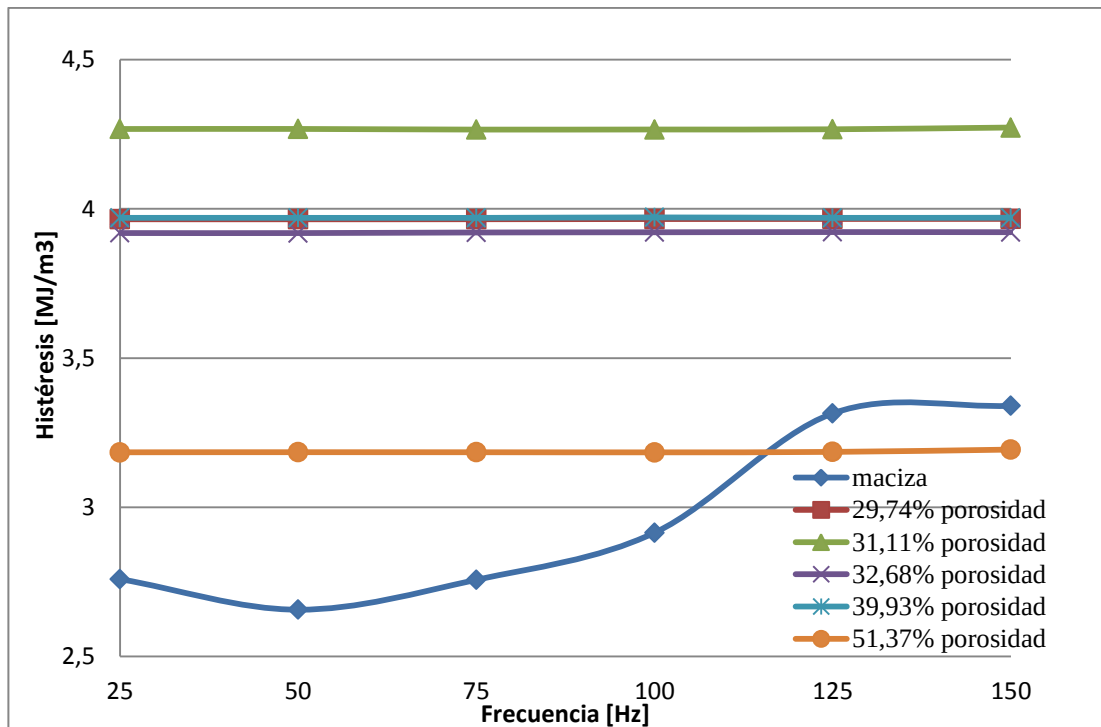


Figura 96: Área de histéresis variando la frecuencia con una amplitud de 42 [KN] en cada probeta.

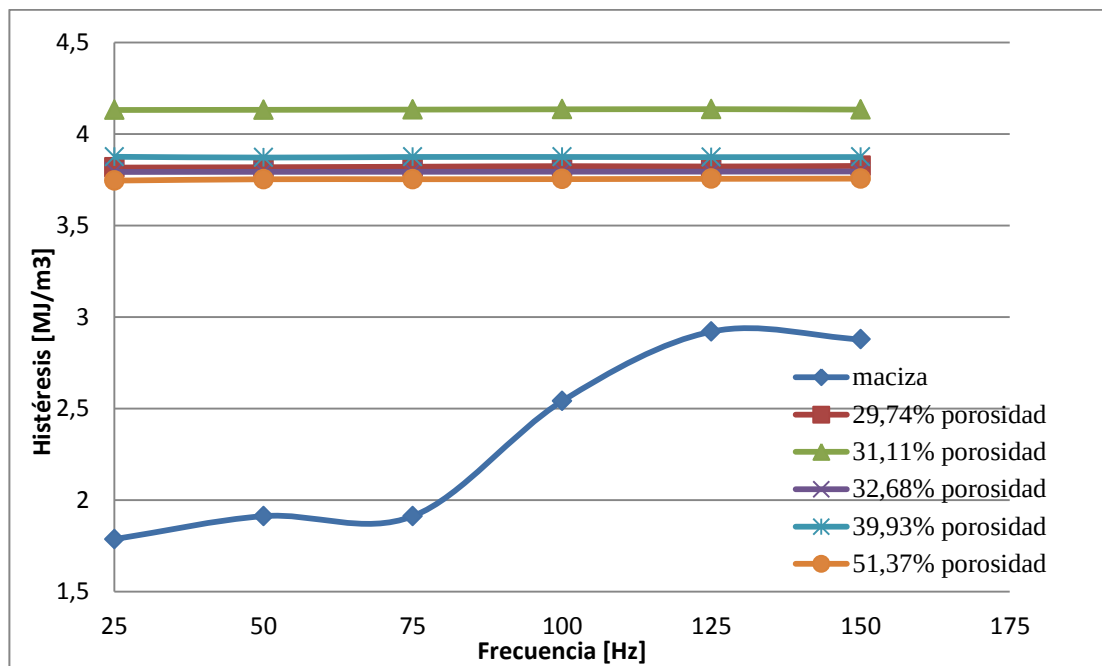


Figura 97: Área de histéresis variando la frecuencia con una amplitud de 39 [KN] en cada probeta.

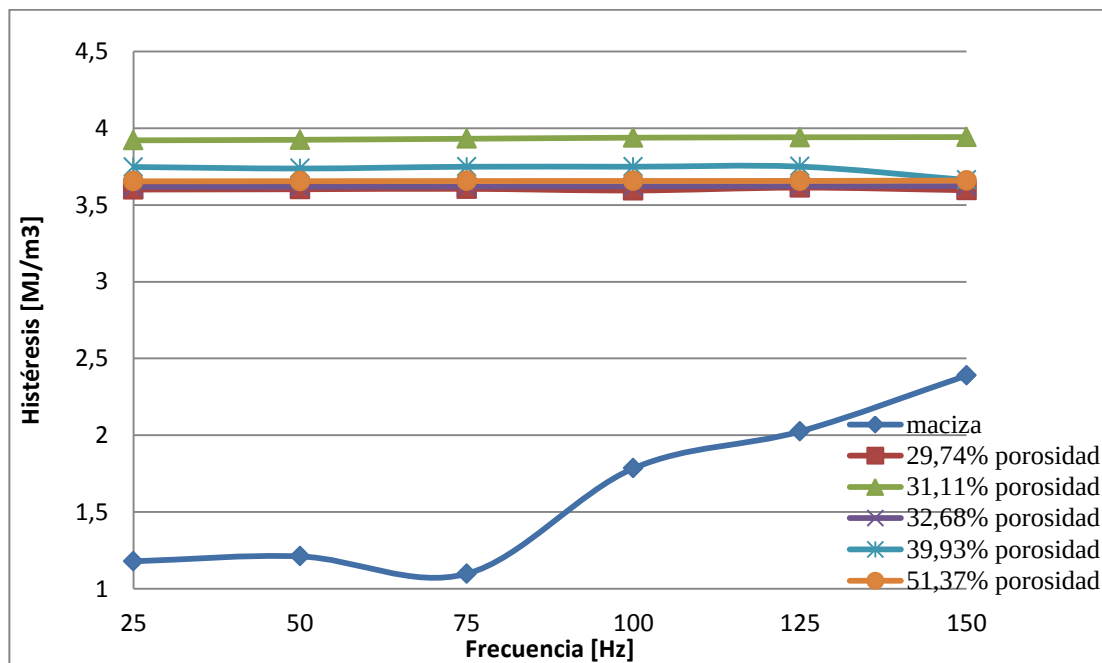


Figura 98: Área de histéresis variando la frecuencia con una amplitud de 36 [KN] en cada probeta.

Para las cuatro gráficas anteriormente expuestas se muestra que la probeta con 51,37% de poros es la que menor energía disipó, representado en su área de histéresis.

Las gráficas muestran que las probetas con poros entregan una capacidad de disipación de energía constante a medida que aumenta la frecuencia de excitación, por el contrario un cilindro macizo representado por un modelo macizo, muestra que los resultados por el MEF aumentan su disipación a medida que se eleva la frecuencia de trabajo.

A medida que la amplitud disminuye la energía disipada en las probetas con porosidad disminuyen la diferencia entre ellas, con una amplitud de 45 [KN] la diferencia entre la menor histéresis que es la de 51,37% de porosidad y la de 31,11% de porosidad que es la mayor es de 10,3 %, luego para una amplitud de 36 [KN] la diferencia se reduce al 7 %, las Figura 98 muestra que las líneas de disipación de energía están más cercanas entre sí.

Las Figura 99 y 100 entrega el comportamiento de la energía disipada para cada fuerza de amplitud aplicada en las probetas, se observa que a medida que aumenta la fuerza de excitación la energía disipada aumenta, la forma en que estas varían entre las probetas con poros es muy similar siendo la de 31,11% de porosidad la de mayor energía disipada, por otro lado el modelo sin poros tiene un crecimiento con una pendiente mayor. En el gráfico de la Figura 99 se ve una diferencia de 69,9% más entre una probeta con un 31,11% de poros con respecto a una sin porosidad, es decir la cantidad de energía disipada para una amplitud de 36 [KN] aumento en 3,3 veces al modelar un porcentaje de 31,11 % de porosidad con respecto a una sin poros, a medida que aumenta la fuerza de excitación esta diferencia va disminuyendo de manera gradual, para una amplitud de 45 [KN] la diferencia de energía disipada es de 1,3 veces mayor entre estos dos modelos.

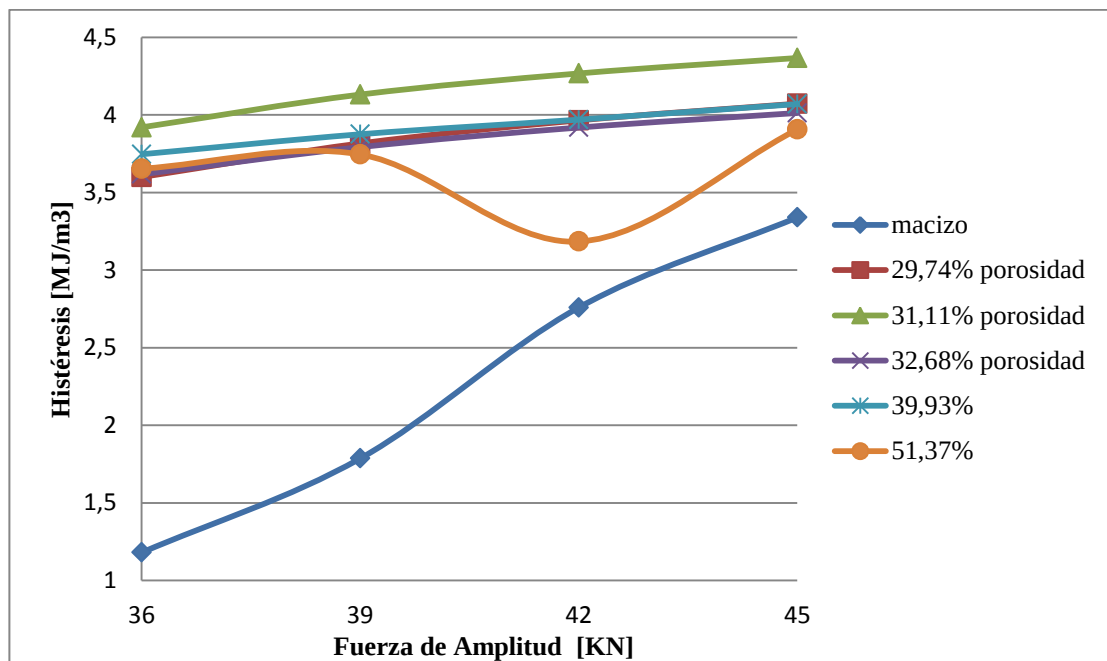


Figura 99: Área de histéresis variando la fuerza amplitud de la vibración con una frecuencia de 25 Hz, para cada probeta.

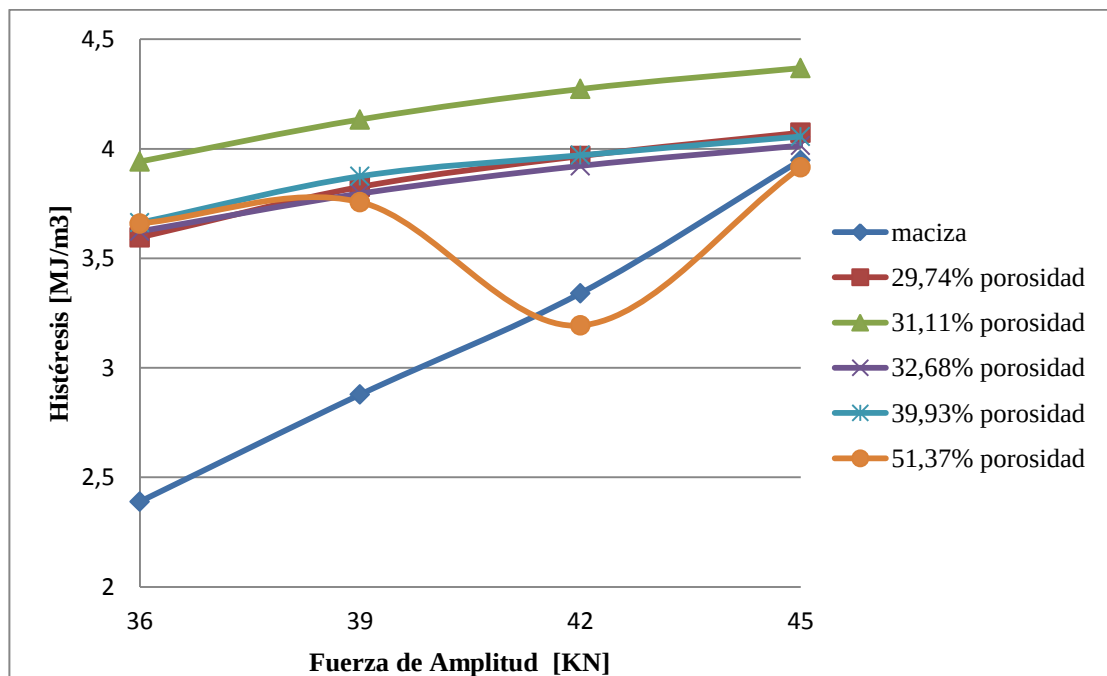


Figura 100: Área de histéresis variando la fuerza amplitud de la vibración con una frecuencia de 150 Hz, para cada probeta.

7.2 Variación del factor de pérdida (η) en las probetas con porosidad.

El factor de pérdida η (loss factor) mide la capacidad de amortiguamiento de los materiales. Los materiales con porosidad bajan su factor de pérdida como se puede ver en la Figura 101, en donde para una amplitud de 45 [KN] el mayor factor de pérdida lo tiene el modelo macizo

El modelo con 29,74% de porosidad resulta ser el que tiene el mayor factor de pérdida con un valor de 0,061 [-] en comparación con los otros modelos con porosidad, a su vez se presenta en la Figura 101 que la diferencia entre el mayor factor de pérdida de la probeta maciza es de un 11,8% mayor con respecto a la de un 29,74 % de poros.

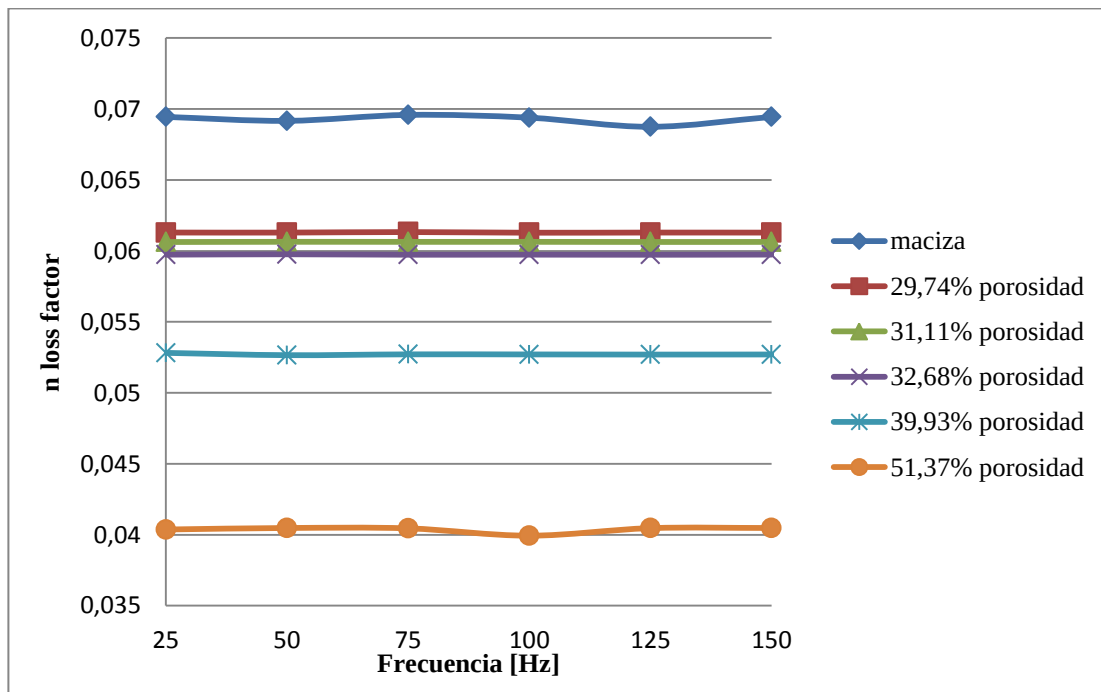


Figura 101: Loss factor η con una amplitud de 45 [KN], en función de la frecuencia de excitación para los modelos calculados.

Para la amplitud de 45 [KN] el valor de η tiene una diferencia entre el valor mayor contra el menor de un 42,6%, este resultado corresponde al modelo con 51,37% de porosidad que arrojo el menor resultado.

En la Figura 102 el factor de pérdida para todos los modelos no cambia de una manera notoria al momento de cambiar la frecuencia de excitación, la Figura 103 cumple con el mismo patrón en donde se mantiene constante el factor para las frecuencias aplicadas.

Para una amplitud de 42 [KN] se tiene una diferencia de 6% entre el mayor factor de pérdida que lo obtiene el modelo macizo respecto al siguiente valor numérico que representa el modelo de 29,74% de porosidad, al disminuir la amplitud en 3 [KN] se genera una reducción en la diferencia de un 5,8% entre estos dos modelos.

Las Figura 102 y 103 muestran un comportamiento similar, a medida que se aumenta el porcentaje de porosidad en las probetas modeladas, el MEF arroja una reducción en el factor de pérdida (η) y este valor es independiente de la frecuencia aplicada, como se muestra en las gráficas por una línea horizontal para cada nivel de porosidad ensayada.

Las gráficas de las Figuras 103 y 104 con amplitud de 39 [KN] y 36 [KN] respectivamente, muestran un comportamiento distinto a las descritas anteriormente. La variación de la frecuencia al ir aumentando generan una caída para el modelo sin poros en los resultados de η , los resultado del factor de pérdida en estos gráficos muestran que son superados los valores del modelo macizo por los medios porosos, esto arroja que es posible mejorar la capacidad de amortiguamiento de los materiales al diseñarlos con poros.

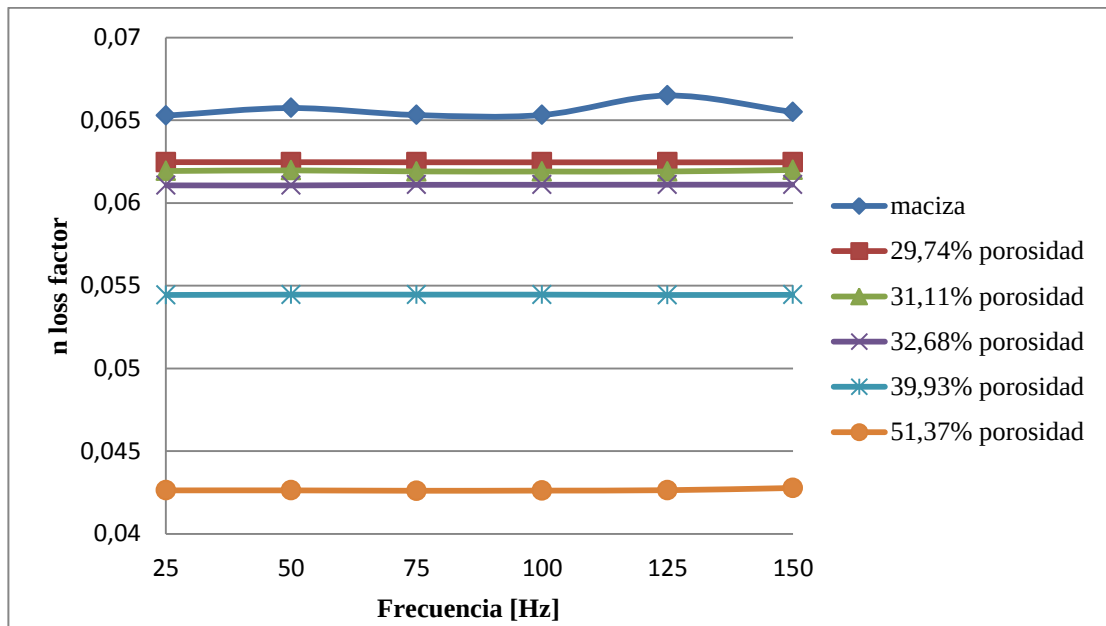


Figura 102: Loss factor η con una amplitud de 42 [KN], en función de la frecuencia de excitación para los modelos calculados.

En la gráfica de la Figura 103 los resultados arrojan que para una frecuencia cercana a los 75 Hz el factor de pérdida para la probeta maciza es superado por los modelos con porosidad de 29,74 % y 31,11%, esta diferencia tiene un máximo de 2,9 % entre el modelo con 29,74% y el sin porosidad para una frecuencia de 25 Hz.

En la Figura 104 el factor de pérdida para las probetas con porosidad se mantienen constantes al variar la frecuencia de excitación con una amplitud de 36 [KN], la probeta sin porosidad se ve alterada para frecuencias por sobre los 75 Hz, siendo la mayor diferencia con respecto a la porosidad de 29,74% de un 12,8% menor.

Para los cuatro gráficos con diferente fuerza de amplitud, el MEF registro que el menor factor de pérdida lo tiene la probeta con porosidad de 51,37%.

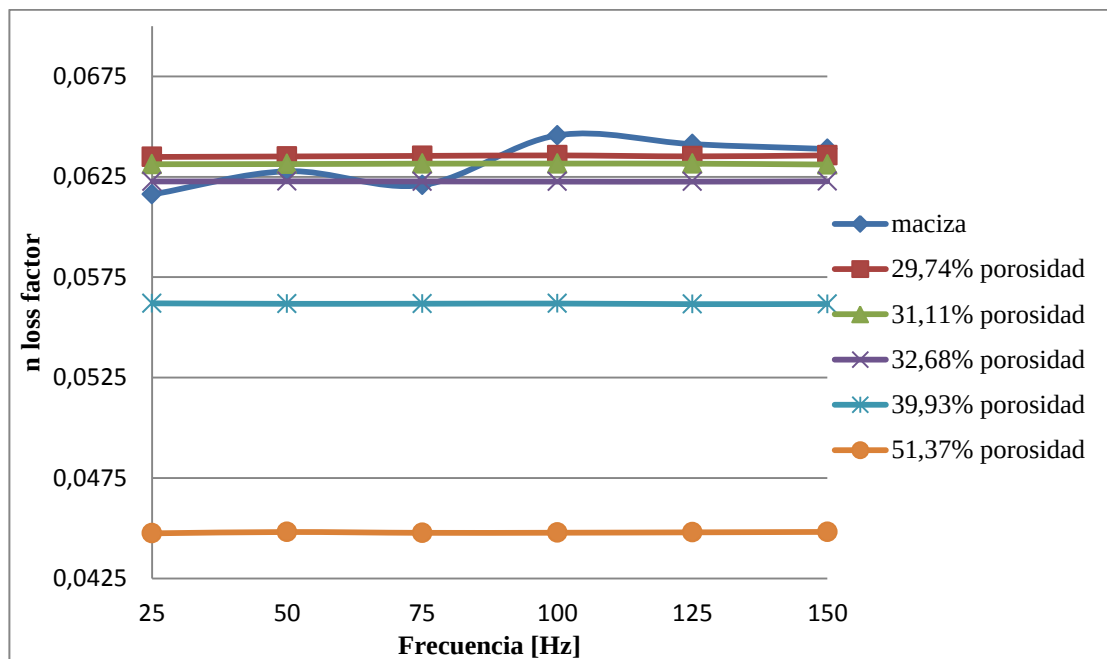


Figura 103: Loss factor η con una amplitud de 39 [KN], en función de la frecuencia de excitación para los modelos calculados.

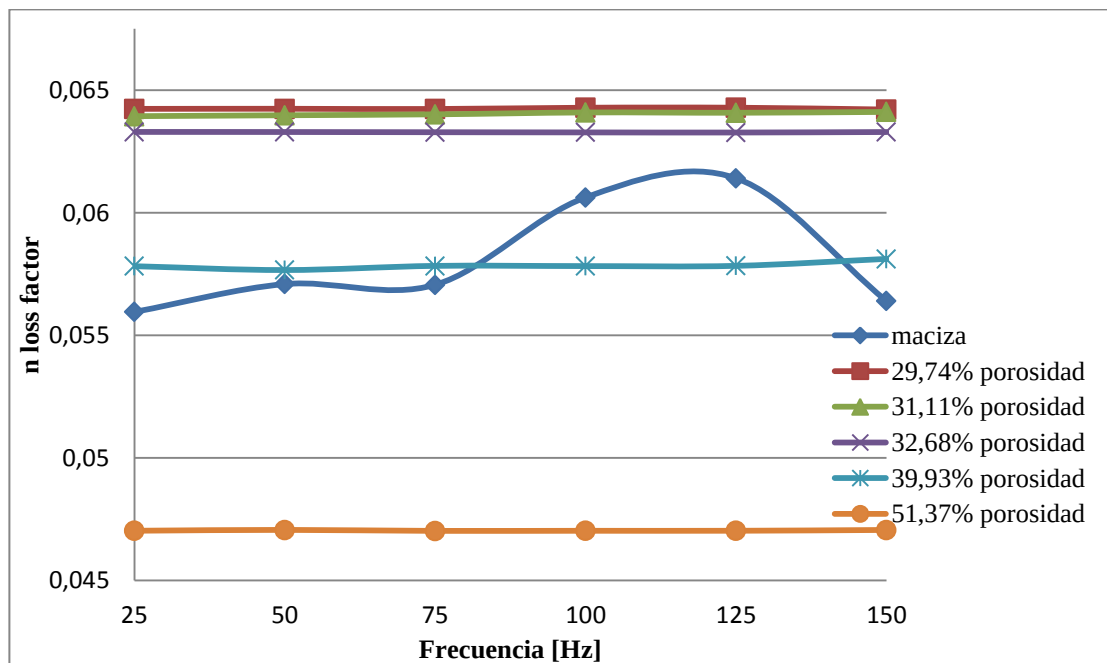


Figura 104: Loss factor η con una amplitud de 36 [KN], en función de la frecuencia de excitación para los modelos calculados.

Los resultados arrojados por el MEF para el factor de pérdida en cada fuerza de amplitud se muestran en las Figuras 105 y 106, se puede apreciar que al variar la fuerza de amplitud sobre las probetas se tiene dos comportamientos distintos para la capacidad de amortiguamiento de los modelos. Primeramente en la Figura 105 el modelo macizo tiene una pendiente positiva a medida que aumenta la amplitud de la fuerza de excitación, el factor de pérdida aumenta aproximadamente de forma lineal a una tasa positiva de 0,0015 [η /KN], por el contrario, las probetas que contienen un porcentaje de porosidad en su volumen bajan su capacidad de amortiguamiento a medida que aumenta la amplitud de la vibración, para el modelo de 29,74% de porosidad la tasa de decaimiento lineal es de 0,0003 [η /KN], la tasa de decrecimiento para las probeta con 31,11% de poros es de 0,0004 [η /KN], el de 39,93% es de 0,0006 [η /KN] y la de 51,37% es de 0,0007 [η /KN], por consiguiente a medida que aumenta la porosidad la tasa de decaimiento del factor de pérdida es levemente más rápida.

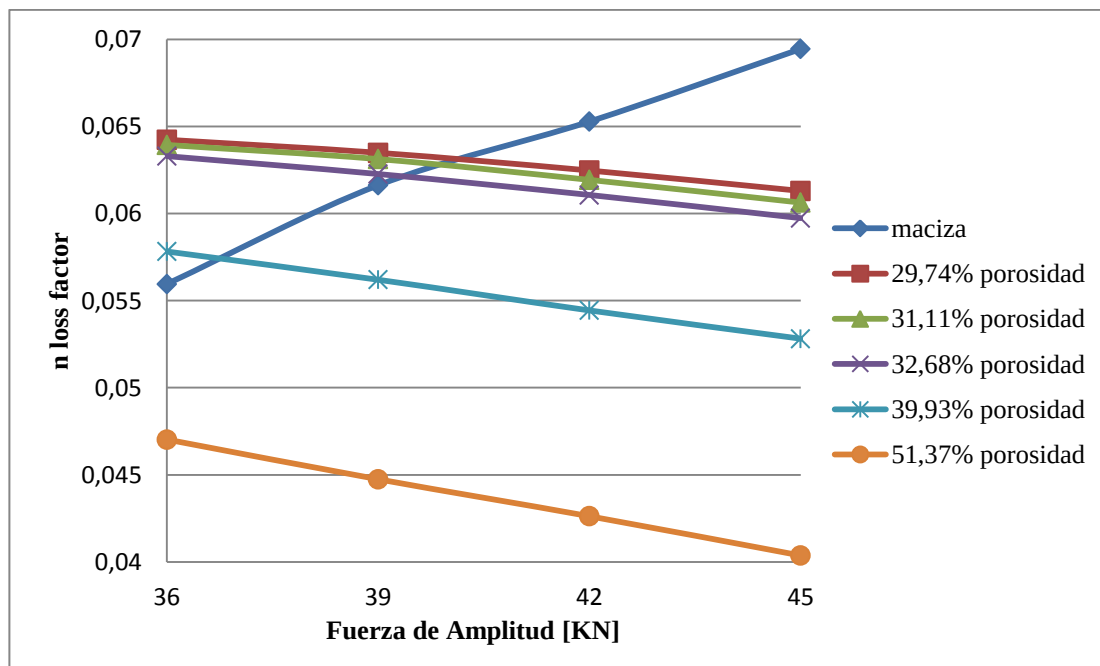


Figura 105: Factor de pérdida (η) para cada fuerza de amplitud de vibración, con una frecuencia de 25 Hz, para cada probeta.

Al comparar las tasas para las probetas sin porosidad con respecto a las con algún porcentaje de porosidad, se obtiene que el modelo simple sin porosidad crece a una tasa 5 veces mayor de lo que decae el modelo con 29,74% de poros, por otro lado comparándola con la de mayor porosidad que es la de 51,37% de poros, es casi 2 veces mayor la razón de cambio. El modelo MEF arroja que los poros en el volumen de los modelos disminuyen el factor de pérdida a una baja tasa.

En la Figura 106 se aprecia que al cambiar la frecuencia de excitación a 150 Hz, los resultados para el factor de pérdida siguen la misma tendencia al variar la fuerza de amplitud, las tasas para cada probeta con y sin porosidad se mantienen iguales.

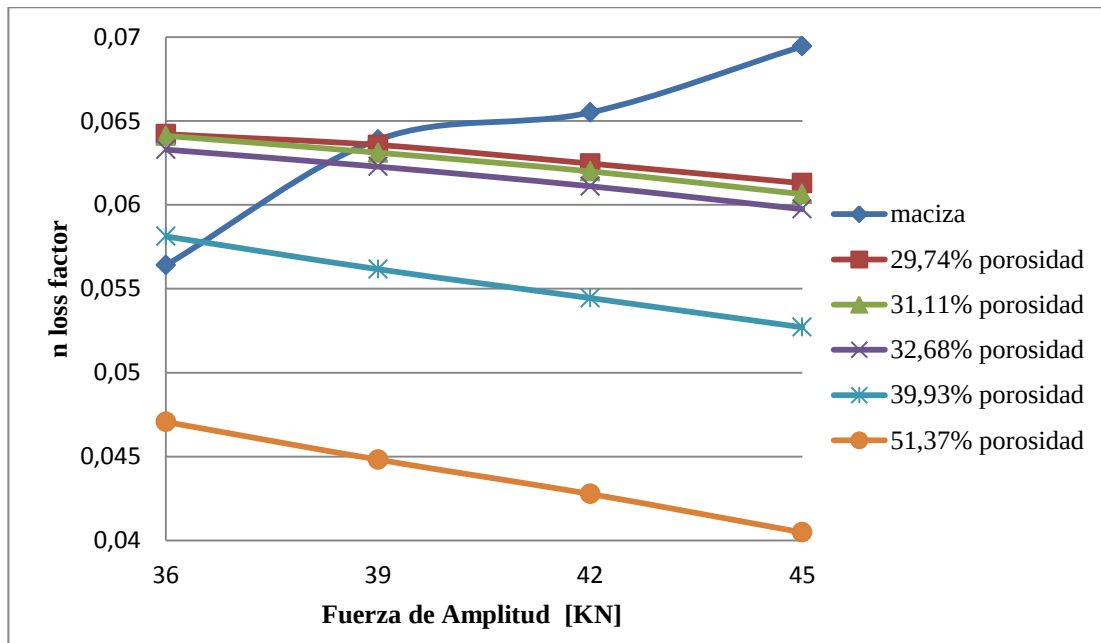


Figura 106: Factor de pérdida (η) para cada fuerza de amplitud de vibración, con una frecuencia de 150 Hz, para cada probeta.

7.2.1 Modelo con 29,74% de porosidad estudiado.

La capacidad de amortiguamiento calculada por medio del factor de pérdida (η), en el modelo con una porosidad del 29,74%, entrego el mejor resultado esperado en comparación con todos los modelos con porosidad. La gráfica de la Figura 107 muestra el valor promedio de η para las diferentes frecuencias calculadas. En este caso se aprecia que el modelo de 29,74% muestra el mejor valor calculado con respecto a los modelos más cercanos a su porcentaje de porosidad (31,11% y 32,68%).

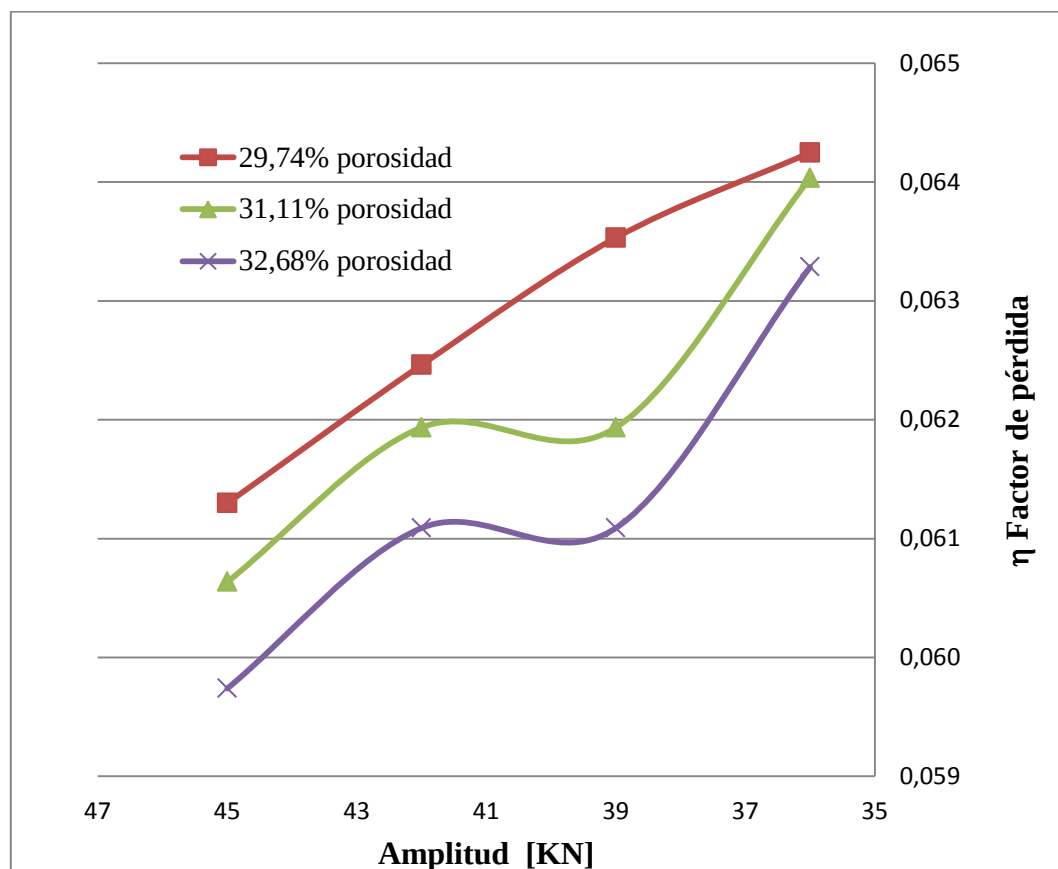


Figura 107: Factor medio de pérdida (η) para los modelos con porosidad de 29,74%, 31,11% y 32,68%.

La Figura 107 se evidencia que las geometrías tienen un aumento en el factor η a medida que se baja la carga de amplitud con que se aplica la modelación, llegando al máximo valor en 36 [KN].

En la gráfica de la Figura 108 se tiene los valores promedio de (η) para las frecuencias calculadas, con amplitudes de 36 [KN]. Para esta carga modelada se obtienen los mayores valores del factor de pérdida para el modelo con 29,74% de porosidad, en este caso su valor de 0,0642 [-] está muy por encima de los 0,0581[-] del modelo sin porosidad, por lo tanto, se calcula una mejora de la capacidad de amortiguamiento del 10,6% para un modelo con poros.

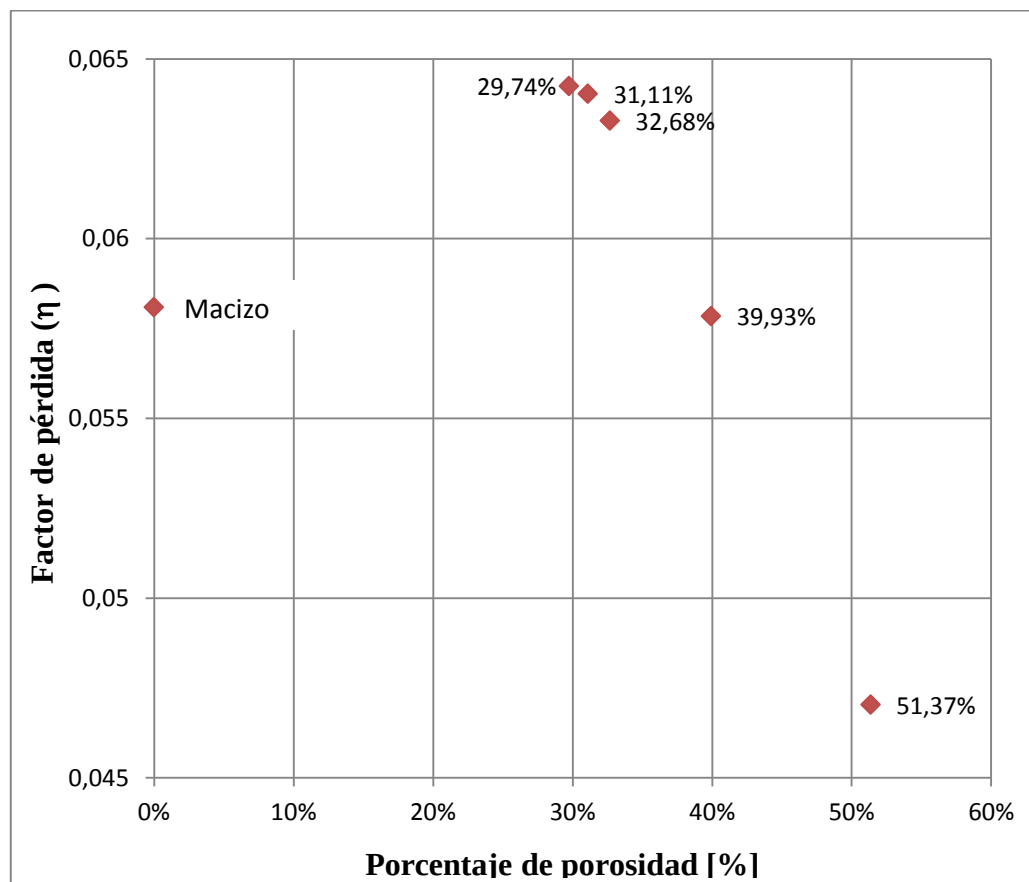


Figura 108: Factor de pérdida (η) promedio para la amplitud de 36 [KN].

Se tiene que a medida que la amplitud de las vibraciones baja, el modelo de 29,74% aumenta la diferencia del factor de pérdida con respecto a un modelo macizo. La gráfica de la Figura 109 muestra la diferencia que se obtiene en los diagramas de “bandera”, y la gráfica de la Figura 110 se ve la razón en la cual cambian los η a medida que se baja la amplitud de la vibración en los dos modelos.

Se tiene que a una menor carga aplicada, los materiales con poros se deforman a un mayor rango, esto contribuye a tener gráficas de esfuerzo vs deformación con áreas de disipación de energía más grandes, en la Figura 110 se tiene que para una carga de 36 [KN] se tiene una diferencia de un 14,7 %, siendo mayor el modelo de 29,74%.

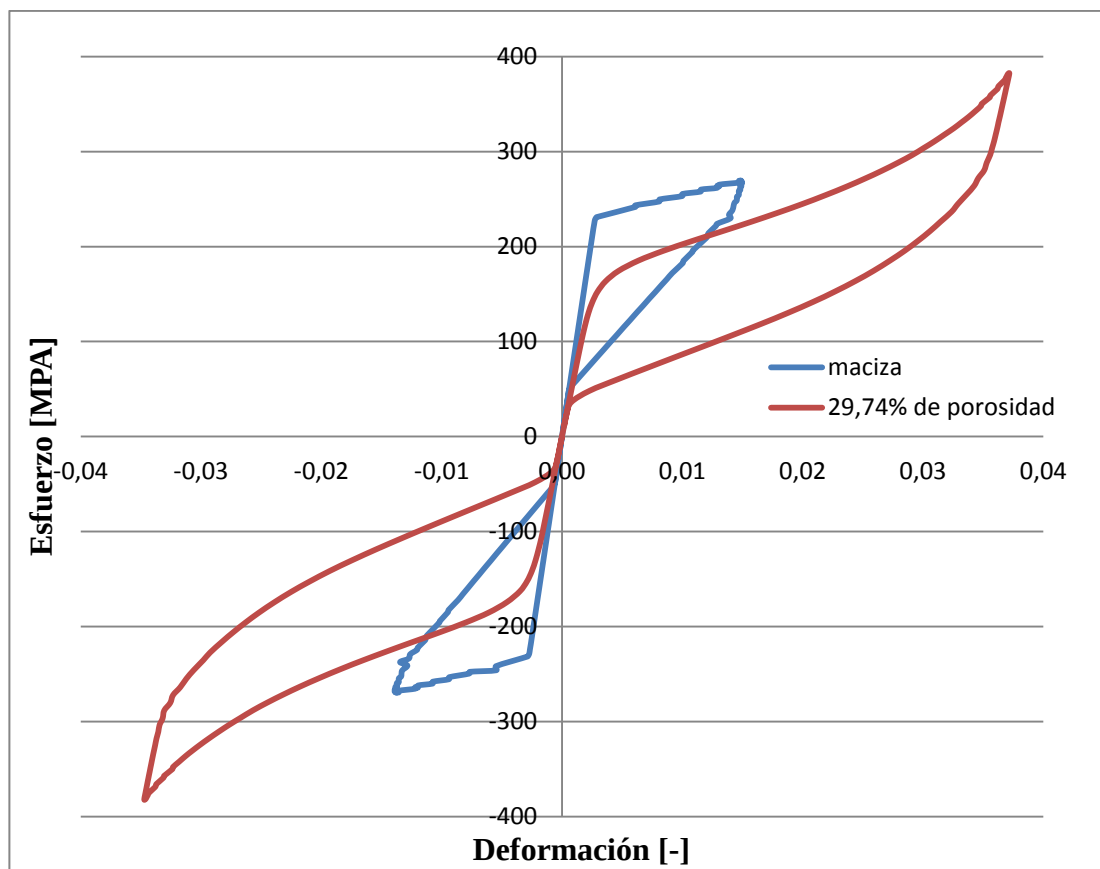


Figura 109: Gráfica esfuerzo vs deformación para el modelo sin porosidad y con un 29,75%, modelado con una amplitud de 36 [KN] en una frecuencia de 25 Hz.

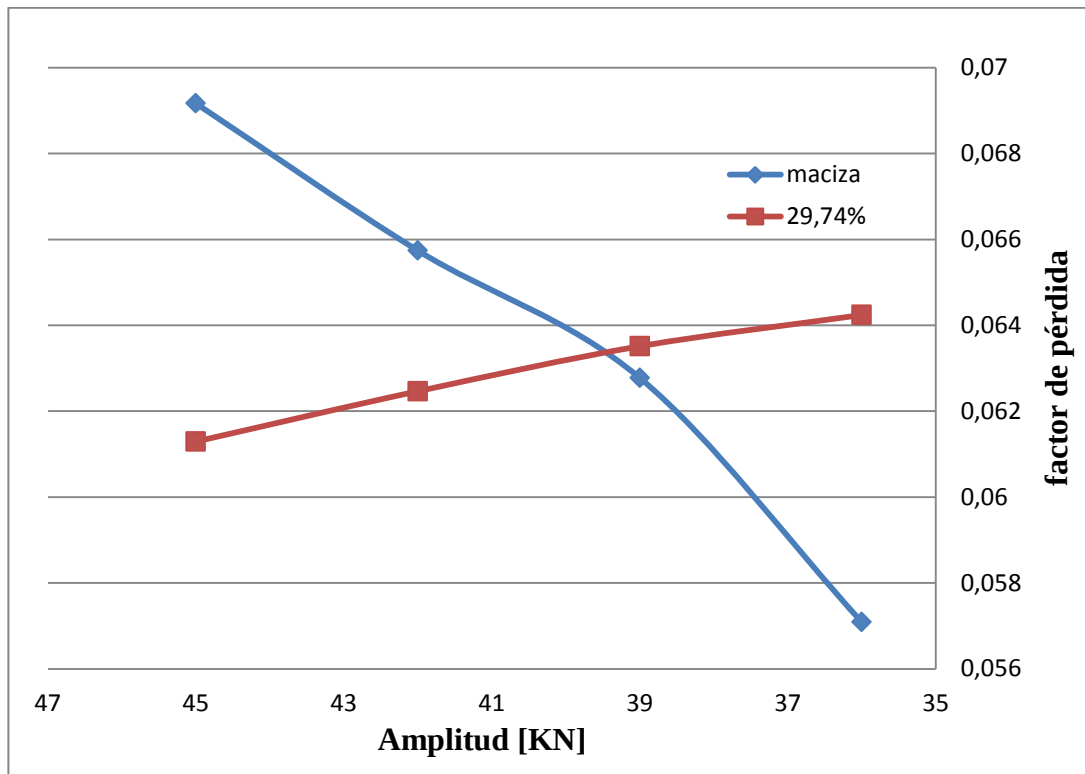


Figura 110: Valores de los factores de pérdida para cada amplitud aplicada a 25 Hz, resultados en modelos de 29,74% y maciza.

En la gráfica de la Figura 110, el Factor de pérdida tiene un comportamiento distinto a medida que baja la carga aplicada para los dos modelos, por un lado, el modelo sin porosidad disminuye su capacidad de amortiguamiento a un tasa de 0,0013, por el contrario, el de 29,74% de porosidad aumenta su capacidad con una leve tasa de 0,0003 a medida que se disminuye la fuerza de vibración aplicada, se tiene que las curvas se intersectan en alrededor de 39 [KN], esto demuestra que para cargas menores los materiales con medios porosos tiene un mejor capacidad de amortiguamiento de vibraciones.

7.3 Gráficas comparativas de amortiguamiento para los modelos de porosidad.

Para comparar los resultados calculados para cada frecuencia y amplitud en los modelos de porosidad, se genera un análisis para cada probeta usando los gráficos *box plot* o gráficas “caja bigote”, estos son usados para conocer la dispersión de los resultados y una fácil forma de comparación entre los diferentes grupos de datos.

La Figura 111 se muestra la agrupación en *box plot* de los diferentes modelos analizados en MEF en donde se comparan los resultados de histéresis. En la gráfica se puede apreciar que el modelo sin porosidad es el que tiene la mayor variabilidad de los resultados, el rango intercuartil (RIC) de los resultados sin poros es de $1,42[\text{MJ}/\text{m}^3]$ comparándolos con los RIC de modelos con porosidad estos son más bajos, teniendo valores entre $0,25$ y $0,55 [\text{MJ}/\text{m}^3]$, este resultado demuestra que los valores de los datos para la probeta maciza tienden a dispersarse ampliamente y por el contrario los modelos con espumas muestran que ubican gran parte de los resultados en el centro de la distribución.

Por otro lado los niveles de disipación de energía calculados son mayores para la probeta de 31,11% de poros, con valores que se mueven entre $3,9$ y $4,3 [\text{MJ}/\text{m}^3]$. Los resultados de la media y mediana en las cajas no tienen diferencias notorias, la mayor media es la del modelo con 31,11% de porosidad con $4,17 [\text{MJ}/\text{m}^3]$, lo sigue la con 39,93% de poros con una media de $3,9 [\text{MJ}/\text{m}^3]$, las siguientes son $3,86 [\text{MJ}/\text{m}^3]$, $3,83 [\text{MJ}/\text{m}^3]$, $3,62 [\text{MJ}/\text{m}^3]$ y $2,64 [\text{MJ}/\text{m}^3]$, correspondiente a los modelos de 29,74% 32,68% 51,37% y macizo respectivamente.

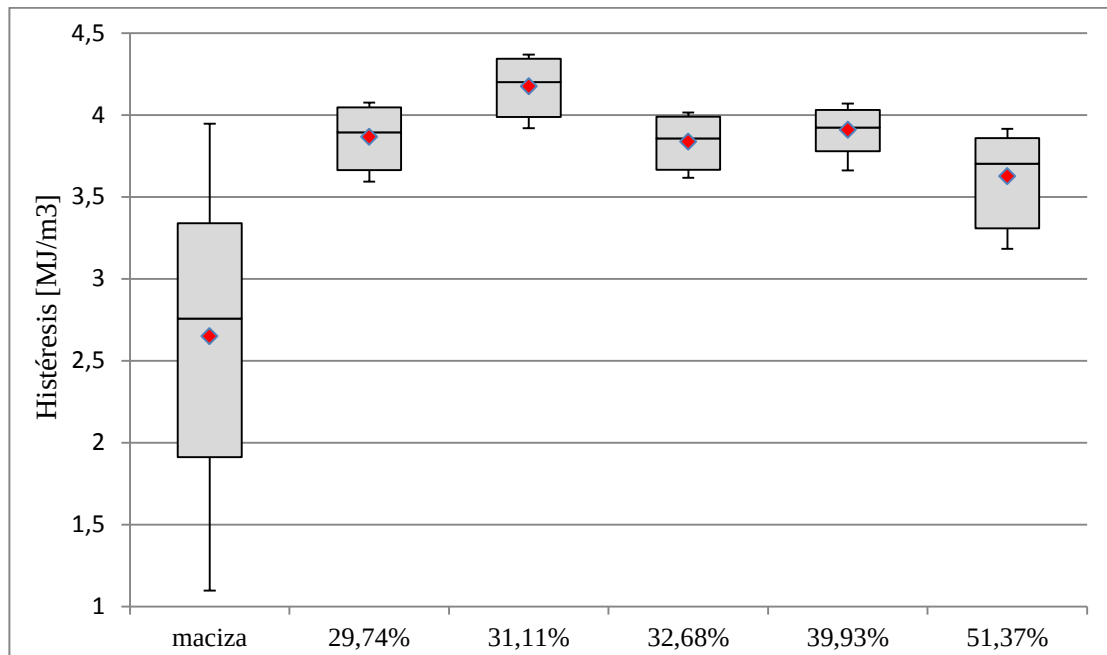


Figura 111: Box plot de los valores de histéresis para los diferentes modelos porosos y macizo.

Por otro lado la Figura 112 muestra las gráficas box plot para los resultados de factor de pérdida (η) calculados para cada modelo, agrupando los datos que se obtuvieron con diferentes amplitudes y frecuencias.

En la Figura 112 se puede apreciar que el modelo macizo nuevamente es el que tiene la mayor variabilidad de los resultados de factor de pérdida. El rango intercuartil (RIC) de los resultados de la probeta maciza es de 0,0067 [-], comparándolos con los RIC de modelos con porosidad estos son más bajos, teniendo valores entre 0,0024 y 0,0054 [-], este resultado demuestra que los valores de los datos para la probeta sin poros tienden a dispersarse más, por otro lado los modelos con espumas arrojan que gran parte de los resultados se ubican en el centro de la distribución.

Por otro lado los niveles de factor de pérdida calculados son mayores para la probeta maciza, con valores que se mueven entre 0,055 y 0,069 [-]. Los resultados de la media y mediana en las cajas no grandes diferencias, la mayor media es la del modelo macizo con 0,064 [-], lo sigue la con 29,74% de poros con una media de 0,0628 [-], las siguientes son 0,0624 [-], 0,0615 [-], 0,0552 [-] y 0,0437 [-], correspondiente a los modelos de 31,11%, 32,68% 39,93% y 53,37% de porosidad respectivamente.

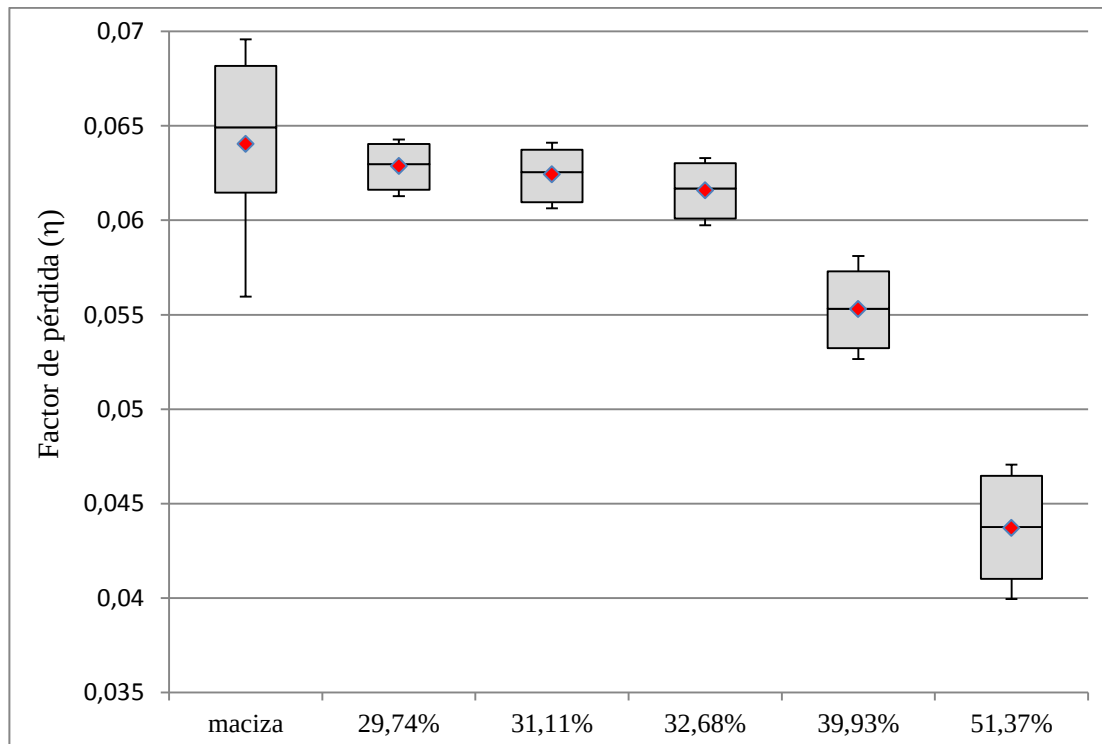


Figura 112: Box plot de los valores de factor de pérdida (η) para los diferentes modelos porosos y el sin porosidad.

7.4 Deformación máxima de los modelos en compresión

Las probetas se deforman de manera distinta, siendo las con mayor porosidad las más comprimidas, producto de que la cantidad de poros debilita la resistencia ante una carga, lo que se traduce en que a un mayor porcentaje de porosidad, más será la deformación ante una fuerza aplicada. La gráfica de la Figura 113 muestra la razón de compresión máxima, para las probetas de 15 mm de largo bajo una frecuencia de 50 Hz, en los modelos para diferentes niveles de carga de vibración aplicada.

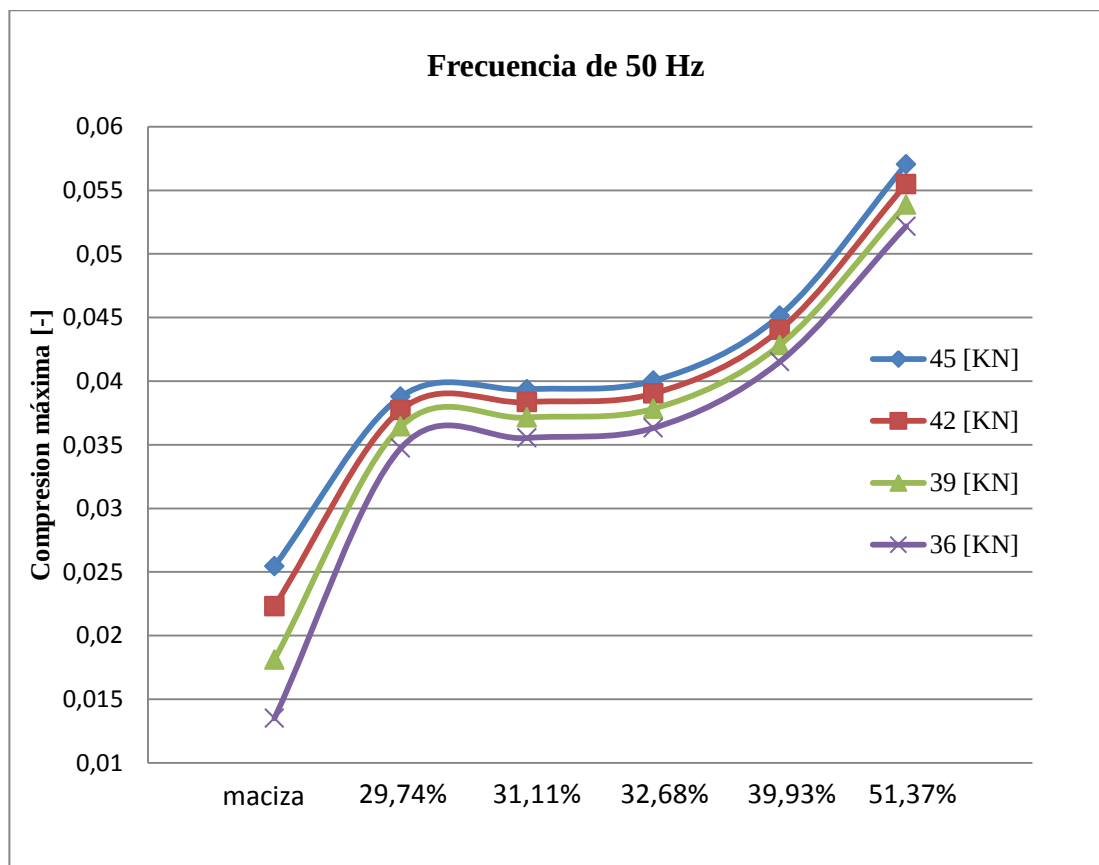


Figura 113: Deformación máxima en compresión de los modelos para cada amplitud, con 50 Hz de frecuencia de excitación.

La máxima deformación longitudinal, se registra con la amplitud máxima de 45 [KN], se muestra en la gráfica de la Figura 113 con un valor de 0.057 [-], esto equivale a un cambio con respecto a la longitud original de la probeta de un 5,7 % o en su defecto a una compresión de 0,855 mm sobre su longitud original de 15 mm de largo. Se tiene que las probetas con poros son más comprimidas con respecto a la sin porosidad, teniendo valores de diferencia con un delta máximo de 0,58 mm.

A medida que aumenta la frecuencia de vibración, la compresión aumenta en valores distintos para cada amplitud, siendo el modelo macizo el que se tiene una mayor diferencia, en los modelos con porosidad estos aumentos son pequeños y en algunos casos muy cercanos a cero. La Tabla 8 se tiene la diferencia en la compresión máxima para frecuencias de 150 Hz y 50 Hz, en amplitudes de 45 [KN] y 36 [KN].

Tabla 8: Diferencias en la compresión entre las frecuencias de 150 Hz y 50 Hz, en cada modelo

Amplitud 45 [KN]			
	150 Hz	50 Hz	
	Deformación [mm]		Diferencia [mm]
maciza	0,4653	0,3819	0,0834
29,74 %	0,58155	0,58155	0
31,11 %	0,5895	0,59025	0
32,68 %	0,60045	0,60045	0
39,93 %	0,6774	0,67725	0,00015
51,37 %	0,8568	0,8556	0,0012
Amplitud 36 [KN]			
	150 Hz	50 Hz	
	Deformación [mm]		Diferencia [mm]
maciza	0,3876	0,2025	0,1851
29,74 %	0,5205	0,52095	0
31,11 %	0,5346	0,53295	0,00165
32,68 %	0,5454	0,5448	0,0006
39,93 %	0,6381	0,6228	0,0153
51,37 %	0,7836	0,78255	0

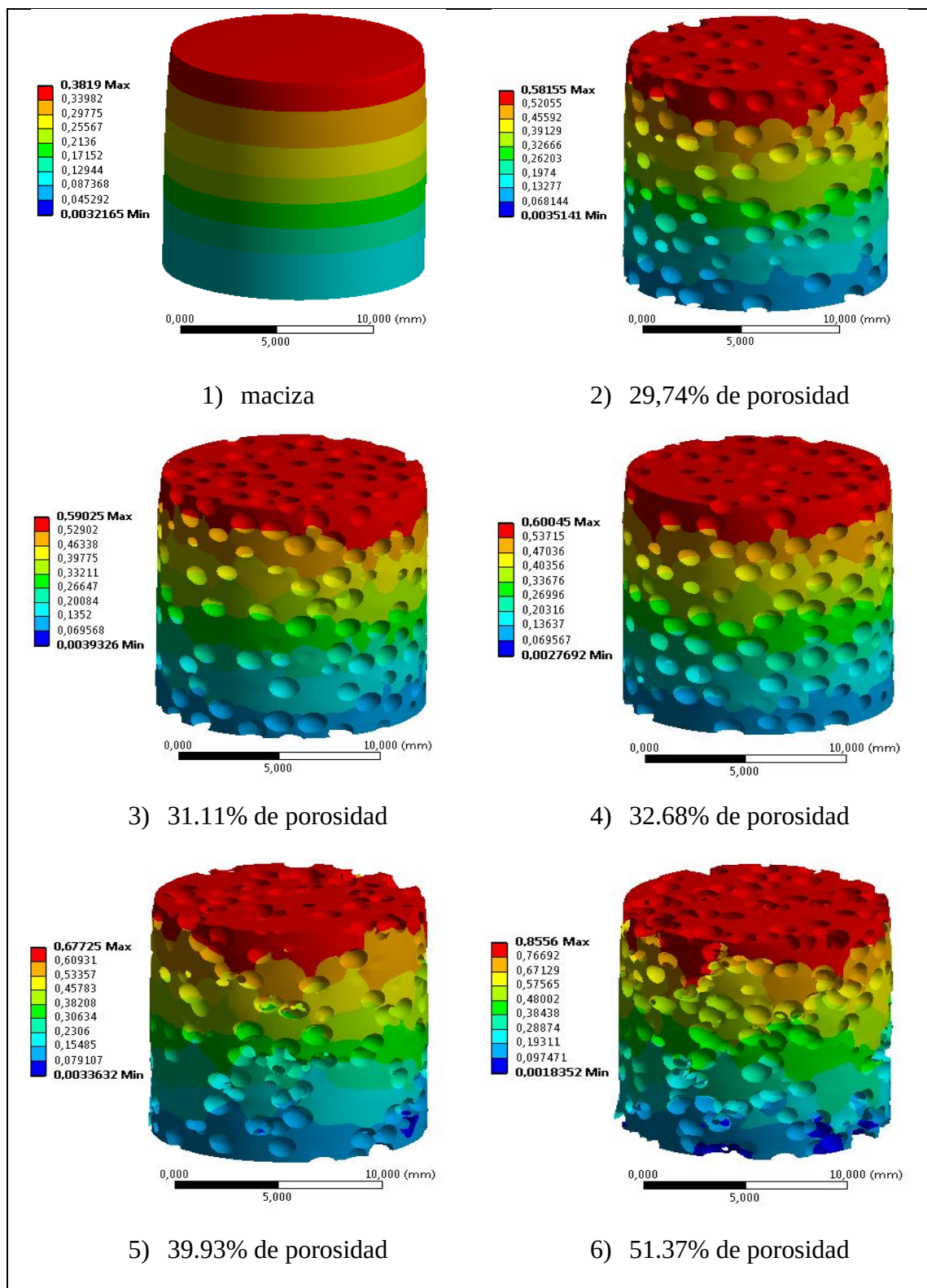


Figura 114: Gráficos de compresión, aplicado con una vibración de 45[KN] y 50 Hz.

7.5 Módulos de Young en las geometrías en tracción.

El módulo de Young en los materiales es un parámetro muy importante y representa la etapa de comportamiento elástico. Para las aleaciones SMA el módulo se representa como la pendiente de las líneas rojas de la Figura 115, en donde está pendiente elástica, parte desde cero y tiene como límite la tensión de inicio de la transformación martensítica.

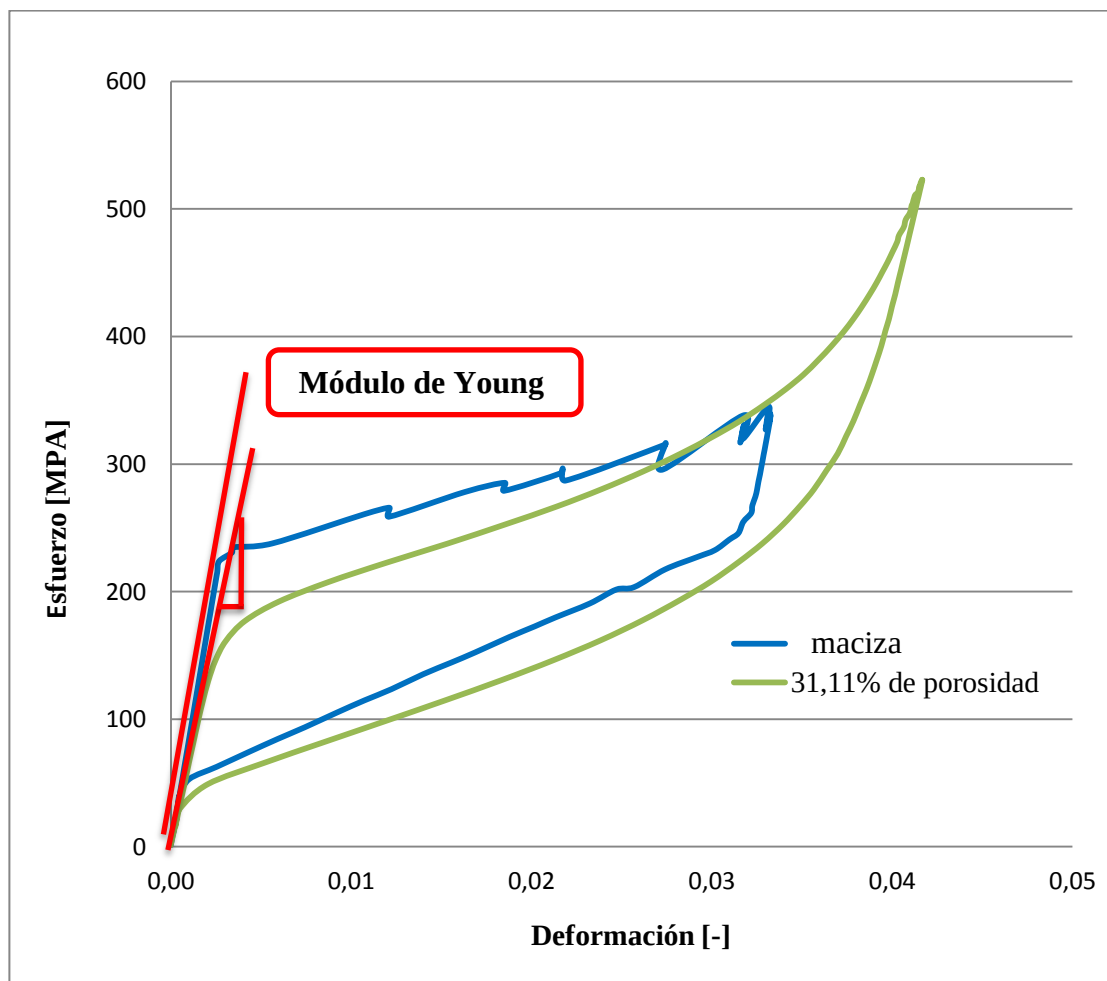


Figura 115: Representación del módulo de Young en gráfica esfuerzo vs deformación, modelo macizo y 31,11% de porosidad.

Los resultados arrojados señalan que a medida que aumenta el porcentaje de porosidad el módulo de Young disminuye de forma muy lineal, se muestra en la gráfica de la Figura 116 que para las mediciones con amplitudes de 45 [KN] y 36 [KN] la diferencia es baja y entrega comportamientos cercanos. Se tiene que para el modelo sin porosidad un módulo de 83,8 [GPA] en contraste de los 29 [GPA] calculados para el modelo con 51,37%.

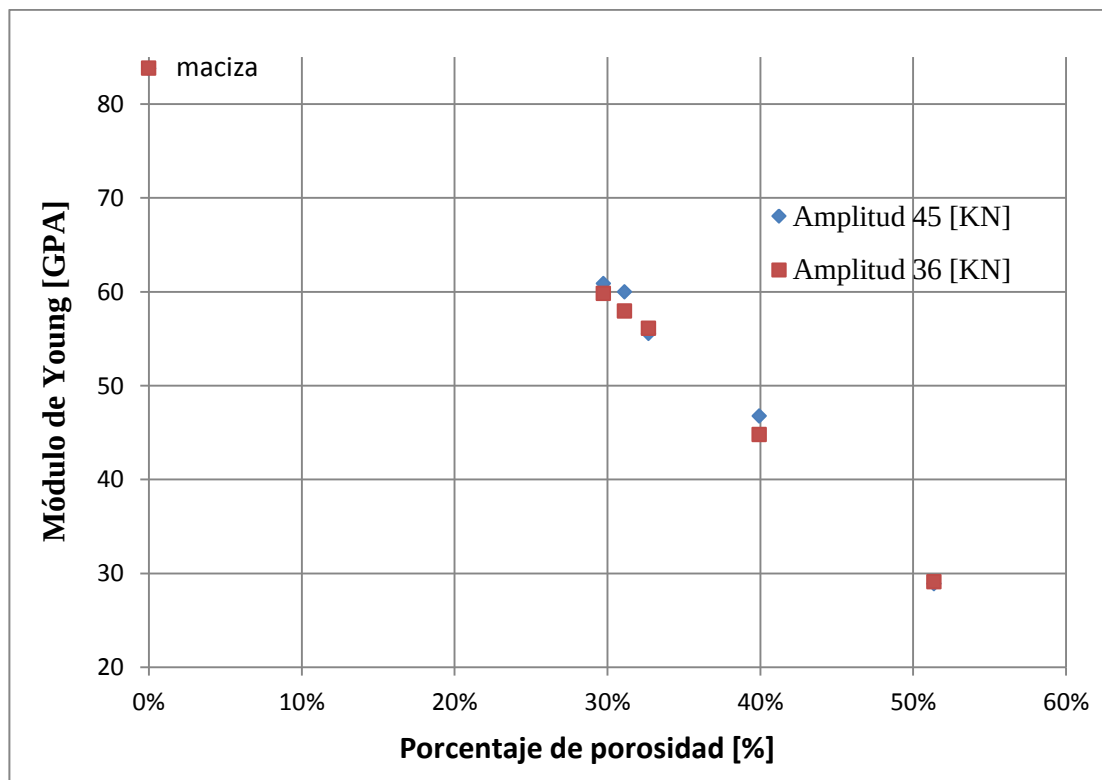


Figura 116: Modulo de Young para el nivel de porosidad en las probetas, mediciones con amplitudes de 45 [KN] y 36 [KN].

8 Conclusiones

Este trabajo entrega diferentes conclusiones en cuanto a la capacidad de amortiguación de las espumas de aleación con memoria de forma CuALBe.

Como primeros resultados obtenidos se tiene que la deformación longitudinal, en respuesta de las vibraciones aplicadas sobre las espumas en comparación con el modelo sin porosidad, entregan resultados distintos. Las espumas al tener cavidades en su interior tienen una mayor capacidad de deformación que también va acompañado de una respuesta constante en la amplitud generada para cada frecuencia de excitación aplicada. Los resultados para una vibración de 45 [KN] con rangos de frecuencia entre 25 Hz y 150 Hz, sobre una probeta maciza, entregan una deformación máxima que varía entre $29,6 \mu\text{m}$ – $33,7 \mu\text{m}$, por otro lado sobre una probeta con un 31,11% de porosidad la deformación máxima oscila entre $41,66 \mu\text{m}$ – $41,67 \mu\text{m}$. El rango de estos dos resultados son muy diferentes, por un lado la probeta maciza tiene $4,06 \mu\text{m}$, al contrario del modelo con un 31,11 % de poros que arroja un rango $0,01 \mu\text{m}$, este resultado se repite para los cuatro modelos con porosidad analizados, este valor entrega que las probetas con porosidad tiene una respuesta constante para una excitación con diferentes niveles de frecuencia, a su vez las gráficas esfuerzo vs deformación para las probetas con porosidad se superponen entre sí para cada frecuencia aplicada con una misma amplitud, demostrando que los poros estabilizan las deformaciones para diferentes frecuencias de vibración.

La resistencia a la deformación elástica representado por el módulo de Young, tiene como resultado una disminución de este valor a medida que aumenta el porcentaje de porosidad, del valor nominal de 83 [GPa] baja a 29 [GPa] en el modelo 51,37% de poros, esta respuesta se debe a la mayor capacidad de deformación que se tiene al aumentar la concentración de poros en los modelos.

La energía mecánica disipada que es representada por el área de histéresis encerrada por las curvas de las gráficas esfuerzo vs deformación aumenta en las probetas con porosidad, las gráficas muestran que una probeta sin poros tiene una menor capacidad de disipar energía con respecto a una que tiene porosidad en su volumen, gran parte de este comportamiento se debe a la capacidad que tiene las espumas de deformarse en rangos mayores. La probeta con un 31,11% de porosidad es la que arroja la mayor cantidad de energía disipada con una media en todos los ensayos de 4,17 [MJ/m³], luego al aumentar el porcentaje de porosidad en el volumen de los modelos disminuye la capacidad de disipación, arrojando un valor medio de 3,62 [MJ/m³] para la probeta con 51,37% de porosidad, los resultados con la probeta maciza arroja valores más dispersos en todos los ensayos con una media de 2,64 [MJ/m³], los valores de histéresis demuestran que la porosidad aumenta la capacidad que tiene el material de absorber y disipar energía mecánica en cada ciclo, generando un aumento máximo de alrededor del 57% con respecto a uno modelo sin poros.

Los valores obtenidos para el factor de pérdida (η) muestran una disminución de este factor a medida que aumenta el porcentaje de porosidad en el volumen de las probetas, siendo la de mayor capacidad la probeta con un 29,74 % de porosidad, con un factor medio entre los cálculos de 0,0628 [-], lo sigue la probeta con 31,11% de porosidad con una media muy similar en sus resultados de 0,0624 [-], el valor más bajo se da en la probeta de 51,37% con un factor de pérdida medio de 0,0437 [-], al comparar este valor con el modelo macizo que tiene una media de 0,0640 [-] pero con una dispersión mayor que los demás, se muestra un resultado mayor en un 1,84% con respecto al factor de pérdida del modelo de 29,74%, se tiene que las probetas con poros pierden en su capacidad de amortiguamiento al disminuir su factor de pérdida, los poros debilitan la rigidez de los materiales, volviéndolos más propensos a sufrir deformaciones, debido a esto se tiene un material menos rígido y con un factor de pérdida menor.

Los resultados entregados en este análisis no son del todo confiables, en gran parte por la complejidad del enmallado generado, se tiene un porcentaje bajo de elementos con errores de Jacobiano ($JR < 0$) en todos los modelos con porosidad, por debajo del 1 % del total de elementos, por otro lado, los valores concluidos se deben considerar errores de cálculo por las limitaciones en los modelos utilizados.

En resumen los resultados entregan como conclusiones importantes:

- Los modelos con porosidad tienen una buena respuesta al amortiguamiento de vibraciones, los poros en los modelos aumentan la capacidad de absorber energía mecánica y entregan un factor de pérdida (η) superior en comparación con otros materiales.
- Con una probeta de un 30% de porosidad se mejoran positivamente las capacidades de amortiguación de un SMA de CuAlBe.
- Los medios porosos además de tener la ventaja de su baja densidad para el diseño de estructuras livianas, muestran una buena respuesta en el control de vibraciones en aleaciones con memoria de forma como dispositivos livianos de disipación de energía.
- Los resultados son alentadores para seguir en la investigación con ensayos experimentales en laboratorio de materiales.

Otros puntos que se destacan en las conclusiones de este trabajo:

- El software de elementos finitos ANSYS resulta una gran herramienta para el análisis de cargas dinámicas sobre las espumas.
- Para acelerar y obtener mejores resultados en ANSYS, es necesario tener un computador con grandes capacidades y también tener una licencia de ANSYS con mayor cantidad de permisos.

9 Bibliografía

1. C. Maletta, F. Furguele. 1D Phenomenological Modeling of Shape Memory and Pseudoelasticity in NiTi Alloys. University of Calabria, Department of Mechanical Engineering. Italia, 2012.
2. Silva de la Flor. Aleaciones con memoria de forma. Tesis doctoral. Universidad de Cataluña, España.1999.
3. A. Ziolkowski. Pseudoelasticity of Shape Memory Alloys. Department of Mechanics of Materials, Poland.2015.
4. T. Barrera. Optimización y validación de un método teórico de diseño de aleaciones de Ti libres de Ni con memoria de forma y bajo módulo elástico para aplicaciones biomédicas. Proyecto de título. Universidad Politécnica de Cataluña, 2006.
5. Q. Pan, Cho. The Investigation of a Shape Memory Alloy Micro-Damper for MEMS Applications. Sensors. Department of Mechanical Engineering, Inha University, South Korea. 2007.
6. H. Soul. Aleaciones con memoria de forma, propiedades mecánicas y microestructura. Desarrollo de sistemas de amortiguamiento basados en el efecto superelástico. Tesis Doctorado. Universidad Nacional de Cuyo Argentina. 2011.
7. H. Ming, Wu and Schetky. Industrial Applications for Shape Memory Alloys. Memory Corporation. Pacific Grove, California. 2000, p: 171-182.
8. I. Irausquín. Caracterización Mecánica de Espumas Metálicas y su Aplicación en Sistemas de Absorción de Energía. Tesis Doctoral. Universidad Carlos III, Madrid, 2012, p: 12.
9. Gibson, L.J. and M.F. Ashby. Cellular solids: structure and properties. Cambridge university press,1999.
10. Gutiérrez-Vázquez, J. and J. Oñoro, Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones. Revista de metalurgia, 2008. 44(5): p. 457-476.

11. S. Kurukuri. A Review of Homogenization Techniques for Heterogeneous Materials. Advanced Mechanics of Materials and Structures, Germany, 2004.
12. D. Domancic. Análisis de esfuerzos de probetas porosas de Aluminio Mediante el Método de Elementos Finitos. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, 2014.
13. A. Nashif, Jones, Henderson. Vibration Damping. Canada , 1985.
14. E. Graesser, C. Wong. The Relationship of Traditional Damping Measures for Materials with High Damping Capacity. USA , 1991
15. R. Pascual. Análisis de Vibraciones en Máquinas Rotatorias. Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile. 2011.
16. V. Meruane. Apuntes vibraciones mecánicas. Universidad de Chile. Departamento Ing. Mecánica, 2013.
17. M. Montanaro. Sistema de control de vibraciones en estructuras. Univerisdad Nac. Buenos Aires, 2001.
18. I. Mayer. Diseño de un dispositivo amortiguador basado en el efecto superelástico SMA NiTi. Universidad de Cuyo. Argentina, 2013.
19. A. Duran. Transformaciones microestructurales y amortiguamiento interno de una aleación CuALBe deformada en el rango Post-superelástico. Tesis Ing mecanica. Universisdad de Chile. Santiago, 2014.
20. N.Fernández. Análisis experimental de diferentes aleaciones con memoria de forma para su posible uso como disipador de energia. Tesis maestro ingeniería. Instituto de ingeniería UNAM. México, 2007.
21. O.C Zienkiewicz, R. Taylor. El método de elementos finitos. Vol 1, 1994.
22. ANSYS Mechanical APDL Material Reference. 2013, p113.
23. M. Bucki, C. Lobos, Y. Payan. Jacobian-based repair method for finite element meshes after registration. Engineering with Computers. London, 2010.

10 Anexos

10.1 Modelo CAD sin porosidad

- Geometría y malla

La Figura presenta la geometría de la probeta simulada y la malla generada por ANSYS según las condiciones impuestas en el Mallado del Modelo MEF.

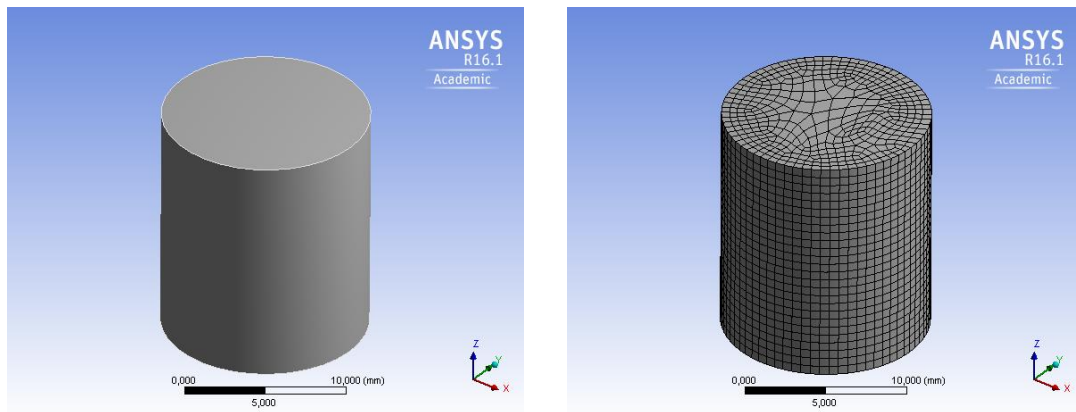


Figura 117: Presenta la geometría de la probeta con su respectivo mallado.

El en mallado de la Figura 117 cumple con las siguientes características:

Statistics	
☐ Nodes	47472
☐ Elements	10842

Figura 118: Cantidad de nodos y elementos en el modelo macizo.

➤ Calidad de elementos (“Element Quality”)

Mesh Metric	Element Quality
Min	0,47945
Max	0,99963
Average	0,91191
Standard Deviation	0,10084

Figura 119: Estadística Métrica de Malla Element Quality, probeta sin porosidad.

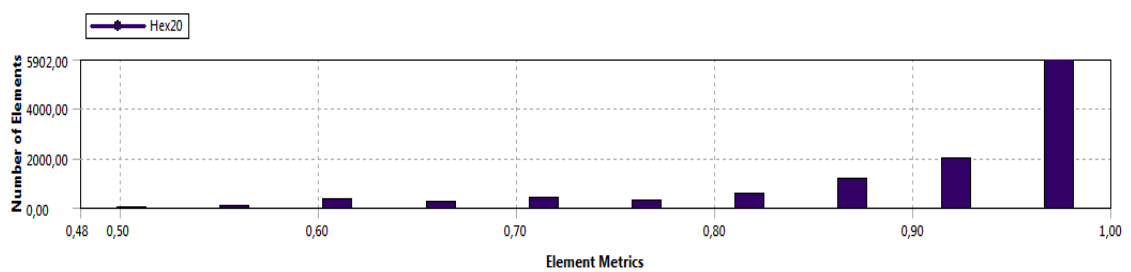


Figura 120: Histograma de Métrica de Malla Element Quality, probeta sin porosidad.

➤ Asimetría (“Skewness”)

Mesh Metric	Skewness
Min	1,9368e-002
Max	0,6835
Average	0,18178
Standard Deviation	0,1484

Figura 121: Estadística Métrica de Malla Skewness, de probeta maciza.

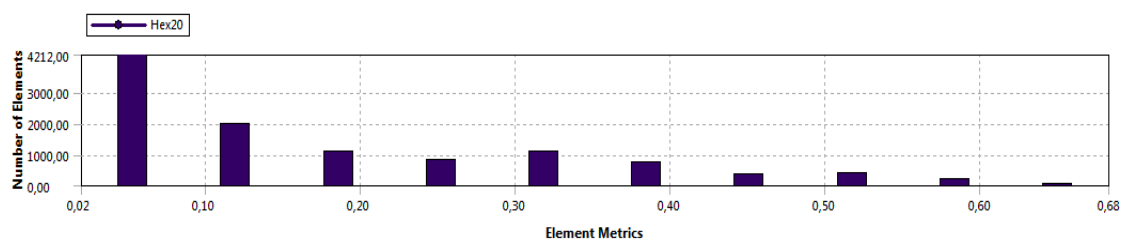


Figura 122: Histograma de Métrica de Malla Skewness, de probeta maciza.

➤ Jacobiano

Mesh Metric	Jacobian Ratio
☐ Min	1,
☐ Max	1,1485
☐ Average	1,0024
☐ Standard Deviation	1,0695e-002

Figura 123: Estadística Métrica de Malla Jacobian Ratio, de probeta maciza.

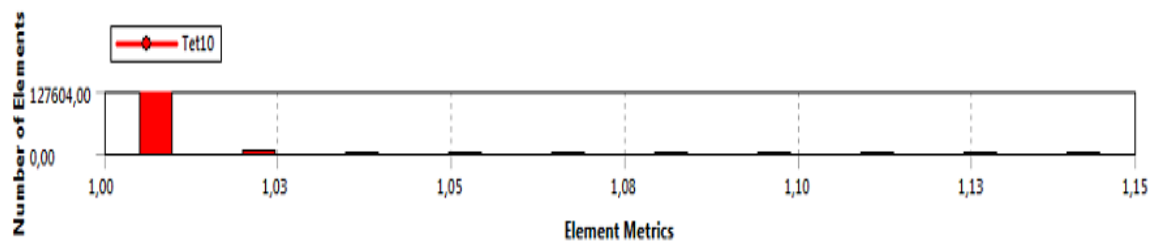


Figura 124: Histograma de Métrica de Malla Jacobian Ratio, de probeta maciza.

10.2 Modelo CAD con 29,74% de porosidad

- Geometría y malla

La Figura presenta la geometría de la probeta simulada y la malla generada por ANSYS según las condiciones impuestas en el Mallado del Modelo MEF.

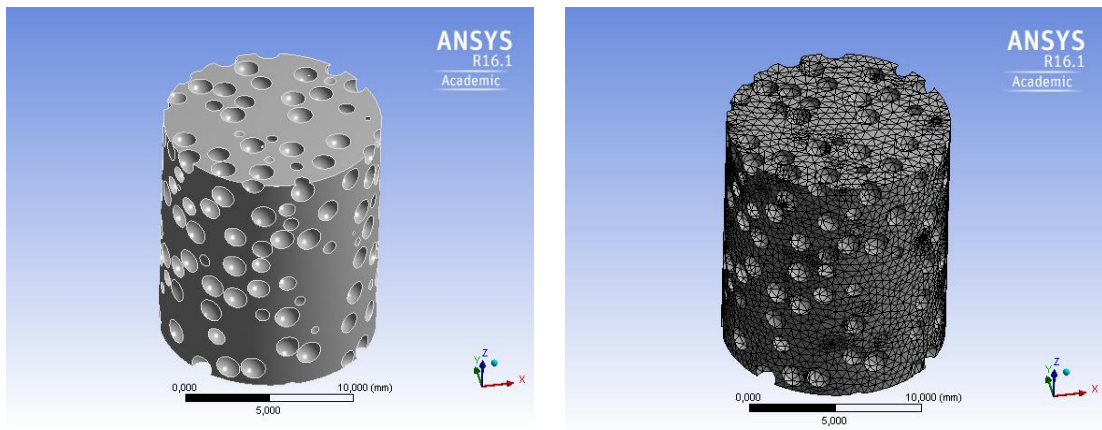


Figura 125: Presenta la geometría de la probeta con su respectivo mallado.

El en mallado de la Figura 125 cumple con las siguientes características:

Statistics	
☐ Nodes	240264
☐ Elements	157545

Figura 126: Cantidad de nodos y elementos en el modelo con 29,74% de porosidad.

➤ Calidad de elementos (“Element Quality”)

Mesh Metric	Element Quality
☐ Min	1,2185e-002
☐ Max	0,99981
☐ Average	0,73092
☐ Standard Deviation	0,17446

Figura 127: Estadística Métrica de Malla Element Quality, probeta con 29,74% de porosidad.

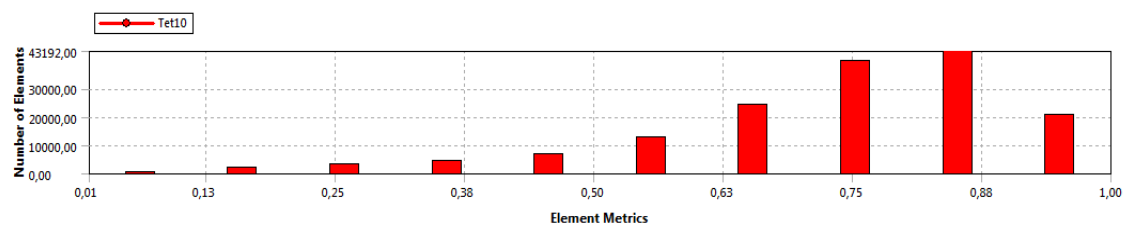


Figura 128: Histograma de Métrica de Malla Element Quality, probeta con 29,74% de porosidad.

➤ Asimetría (“Skewness”)

Mesh Metric	Skewness
☐ Min	2,2762e-004
☐ Max	1,
☐ Average	0,31447
☐ Standard Deviation	0,19508

Figura 129: Estadística Métrica de Malla Skewness, modelo 29,74% de porosidad.

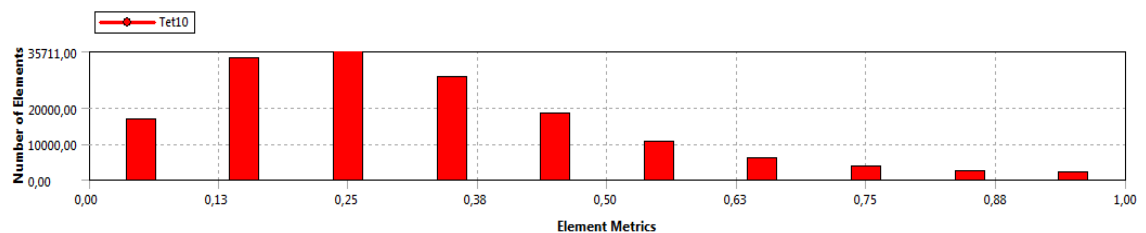


Figura 130: Histograma de Métrica de Malla Skewness, modelo 29,74% de porosidad.

➤ Jacobiano

Mesh Metric	Jacobian Ratio
☐ Min	-100,
☐ Max	4238,
☒ Average	0,95117
☐ Standard Deviation	14,442

Figura 131: Estadística Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 29,74% de porosidad.

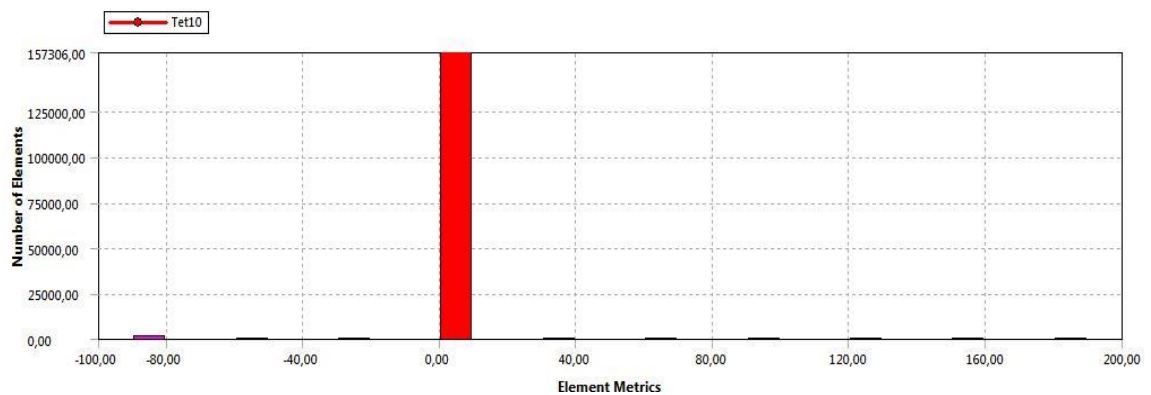


Figura 132: Histograma de Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 29,74% de porosidad.

Se tiene un porcentaje de 0,8% de Jacobian negativos en el total de todos los elementos calculados.

10.3 Modelo CAD con 31,11% de porosidad

- Geometría y malla

La Figura presenta la geometría de la probeta simulada y la malla generada por ANSYS según las condiciones impuestas en el Mallado del Modelo MEF.

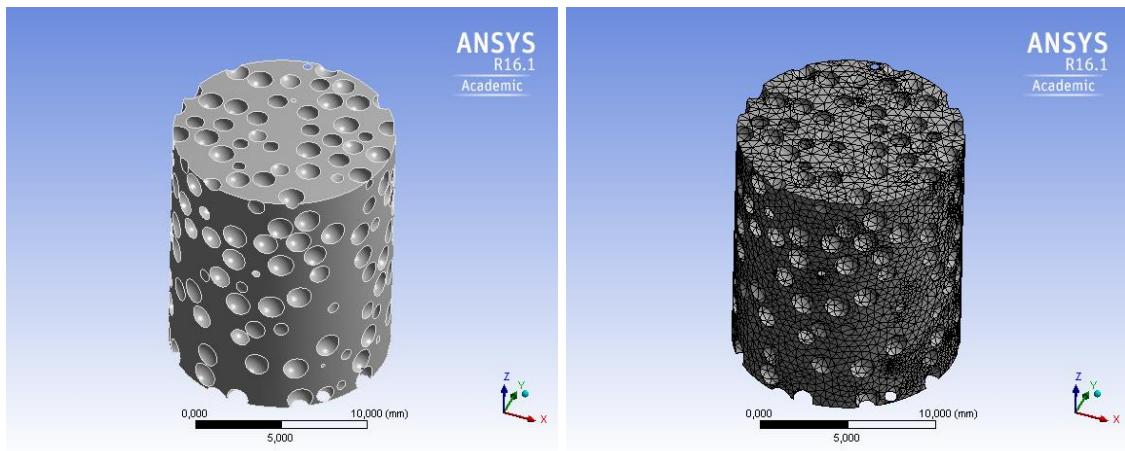


Figura 133: Presenta la geometría de la probeta con su respectivo mallado.

El en mallado de la Figura 133 cumple con las siguientes características:

Statistics	
☐ Nodes	312725
☐ Elements	204883

Figura 134: Cantidad de nodos y elementos en el modelo con 31,11% de porosidad.

➤ Calidad de elementos (“Element Quality”)

Mesh Metric	Element Quality
Min	7,6805e-003
Max	0,99988
Average	0,74192
Standard Deviation	0,16292

Figura 135: Estadística Métrica de Malla Element Quality, modelo de 31,11% de porosidad.

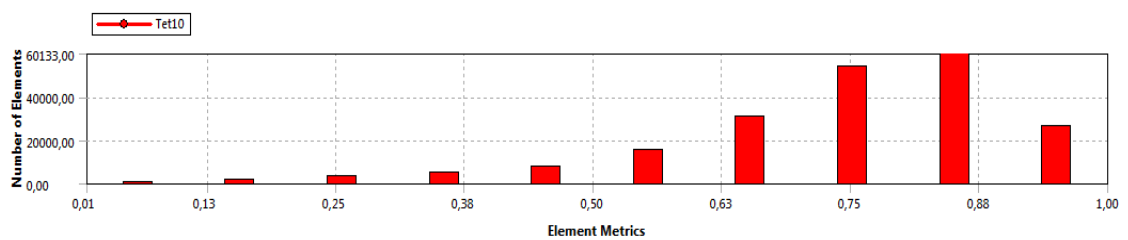


Figura 136: Histograma de Métrica de Malla Element Quality, probeta con 31,11% de porosidad.

➤ Asimetría (“Skewness”)

Mesh Metric	Skewness
Min	1,1775e-005
Max	0,99999
Average	0,30586
Standard Deviation	0,18419

Figura 137: Estadística Métrica de Malla Skewness, modelo de 31,11% porosidad.

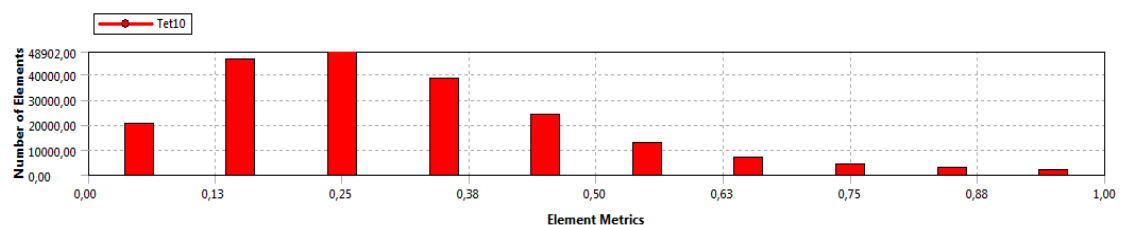


Figura 138: Histograma de Métrica de Malla Skewness, probeta con 31,11% de porosidad.

➤ Jacobiano

Mesh Metric	Jacobian Ratio
☐ Min	-100,
☐ Max	11721
☐ Average	0,5827
☐ Standard Deviation	30,796

Figura 139: Estadística Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 31,11% porosidad.

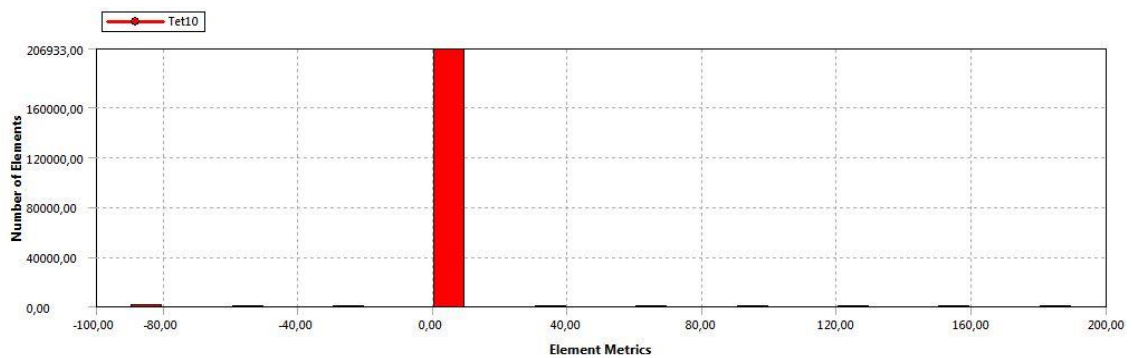


Figura 140: Histograma de Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 31,11% de porosidad.

Se tiene un porcentaje de 0,53% de Jacobian negativos en el total de todos los elementos calculados.

10.4 Modelo CAD con 32,68% de porosidad

- Geometría y malla

La Figura presenta la geometría de la probeta simulada y la malla generada por ANSYS según las condiciones impuestas en el Mallado del Modelo MEF.

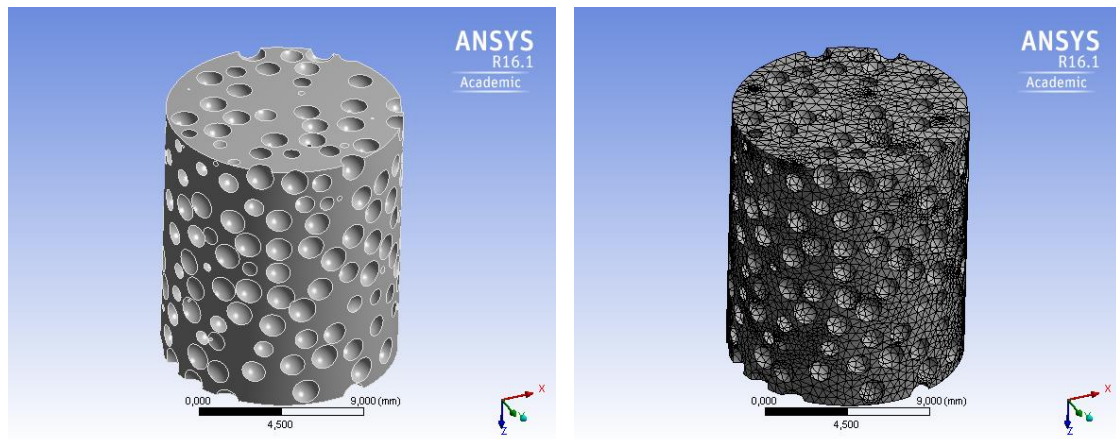


Figura 141: Presenta la geometría de la probeta con su respectivo mallado.

El en mallado de la Figura 141 cumple con las siguientes características:

Statistics	
☐ Nodes	343373
☐ Elements	224267

Figura 142: Cantidad de nodos y elementos en el modelo con 32,68% de porosidad.

➤ Calidad de elementos (“Element Quality”)

Mesh Metric	Element Quality
Min	1,3761e-002
Max	0,99913
Average	0,73795
Standard Deviation	0,16705

Figura 143: Estadística Métrica de Malla Element Quality, probeta con 32,68% de porosidad.

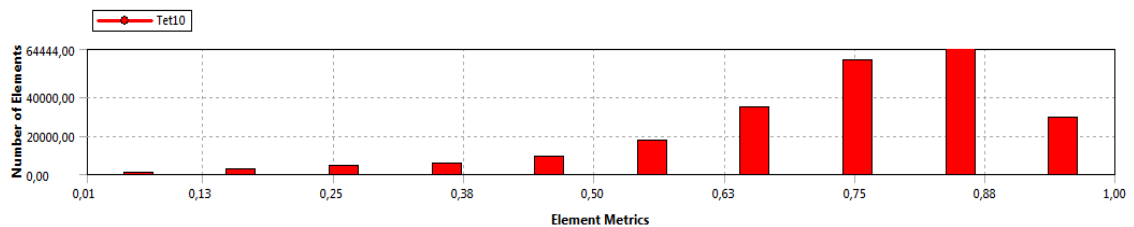


Figura 144: Histograma de Métrica de Malla Element Quality, probeta con 32,68% de porosidad.

➤ Asimetría (“Skewness”)

Mesh Metric	Skewness
Min	3,0912e-004
Max	1,
Average	0,31115
Standard Deviation	0,18879

Figura 145: Estadística Métrica de Malla Skewness, probeta con 32,68% porosidad.

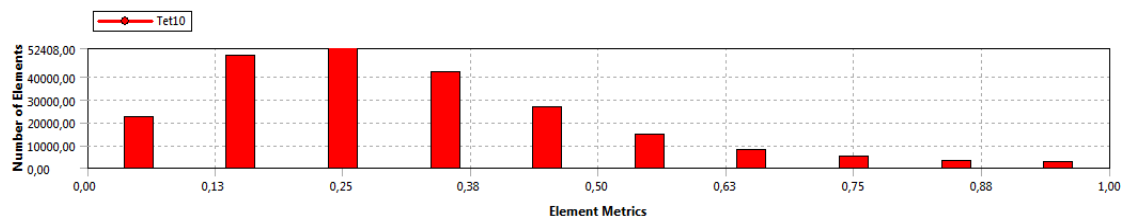


Figura 146: Histograma de Métrica de Malla Skewness, probeta con 32,68% de porosidad.

➤ Jacobiano

Mesh Metric	Jacobian Ratio
☐ Min	-100,
☐ Max	12776
☐ Average	0,65075
☐ Standard Deviation	33,929

Figura 147: Estadística Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 32,68% porosidad.

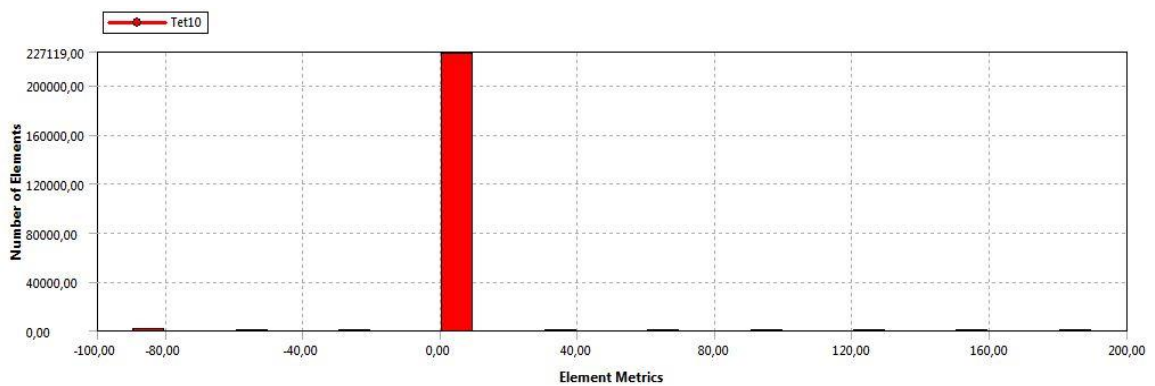


Figura 148: Histograma de Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 32,68% de porosidad.

Se tiene un porcentaje de 0,58% de Jacobian negativos en el total de todos los elementos calculados.

10.5 Modelo CAD con 39,93% de porosidad

- Geometría y malla

La Figura presenta la geometría de la probeta simulada y la malla generada por ANSYS según las condiciones impuestas en el Mallado del Modelo MEF.

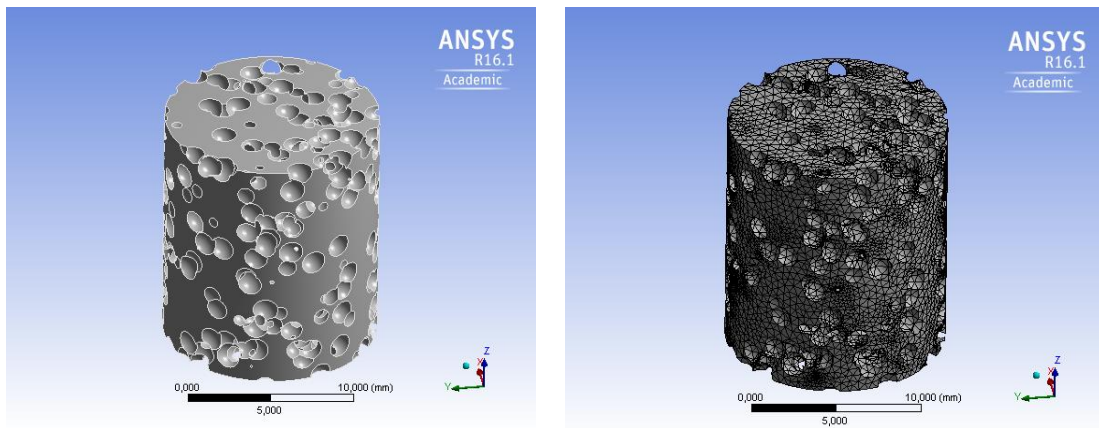


Figura 149: Presenta la geometría de la probeta con su respectivo mallado.

El en mallado de la Figura 149 cumple con las siguientes características:

Statistics	
☐ Nodes	286958
☐ Elements	180540

Figura 150: Cantidad de nodos y elementos en el modelo con 39,93% de porosidad.

➤ Calidad de elementos (“Element Quality”)

Mesh Metric	Element Quality
Min	1,1614e-002
Max	0,99998
Average	0,71907
Standard Deviation	0,17384

Figura 151: Estadística Métrica de Malla Element Quality, probeta con 39,93% de porosidad.

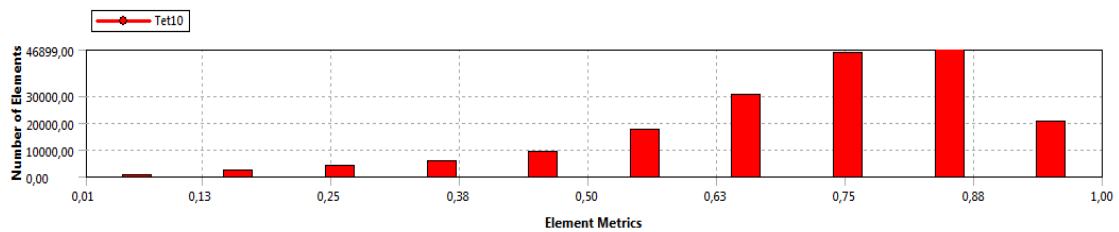


Figura 152: Histograma de Métrica de Malla Element Quality, probeta con 39,93% de porosidad.

➤ Asimetría (“Skewness”)

Mesh Metric	Skewness
Min	5,7539e-004
Max	1,
Average	0,32301
Standard Deviation	0,1948

Figura 153: Estadística Métrica de Malla Skewness, modelos de 39,93% porosidad.

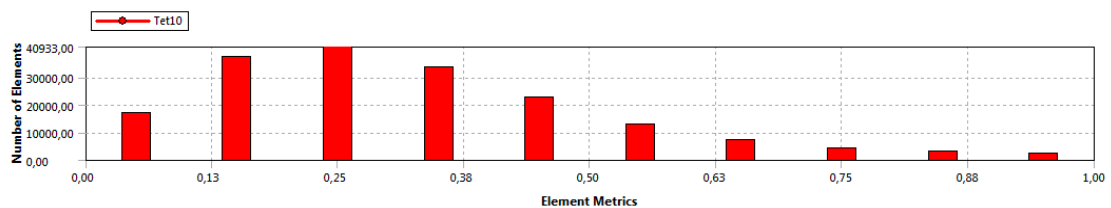


Figura 154: Histograma de Métrica de Malla Skewness, probeta con 39,93% de porosidad.

➤ Jacobiano

Mesh Metric	Jacobian Ratio
☐ Min	-100,
☐ Max	2350,6
☐ Average	0,46298
☐ Standard Deviation	17,059

Figura 155: Estadística Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 39,93% porosidad.

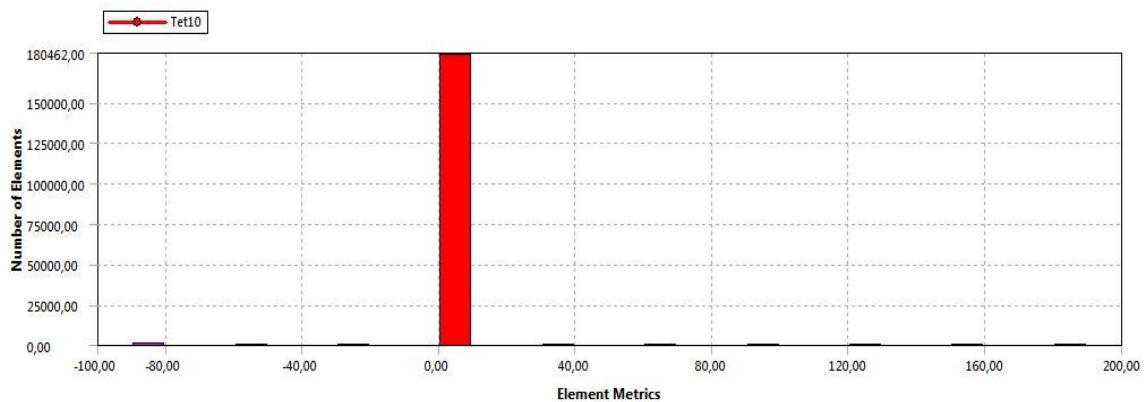


Figura 156: Histograma de Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 39,93% de porosidad.

Se tiene un porcentaje de 0,59% de Jacobian negativos en el total de todos los elementos calculados.

10.6 Modelo CAD con 51,37% de porosidad

- Geometría y malla

La Figura presenta la geometría de la probeta simulada y la malla generada por ANSYS según las condiciones impuestas en el Mallado del Modelo MEF.

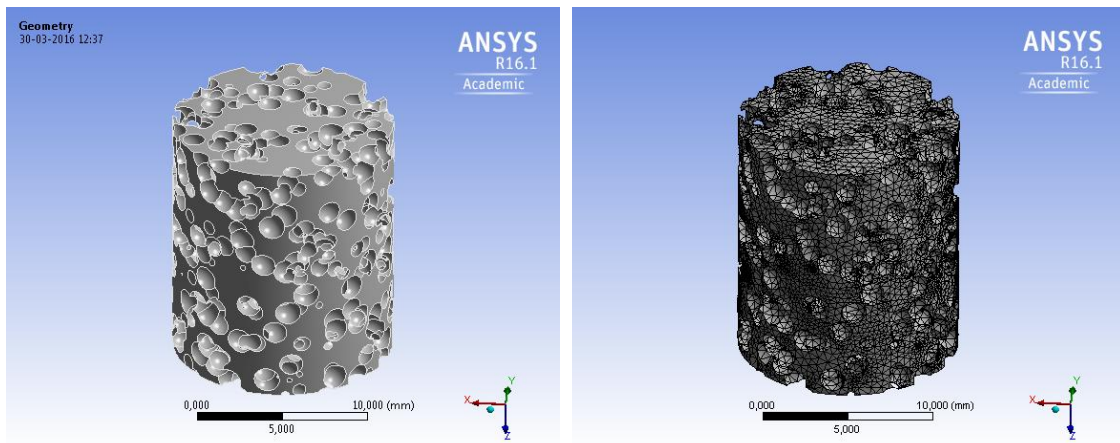


Figura 157: Presenta la geometría de la probeta con su respectivo mallado.

El en mallado de la Figura 157 cumple con las siguientes características:

Statistics	
☐ Nodes	339065
☐ Elements	206372

Figura 158: Cantidad de nodos y elementos en el modelo con 51,37% de porosidad.

➤ Calidad de elementos (“Element Quality”)

Mesh Metric	Element Quality
Min	1,3858e-003
Max	0,99974
Average	0,68683
Standard Deviation	0,19262

Figura 159: Estadística Métrica de Malla Element Quality, modelo de 51,37% porosidad.

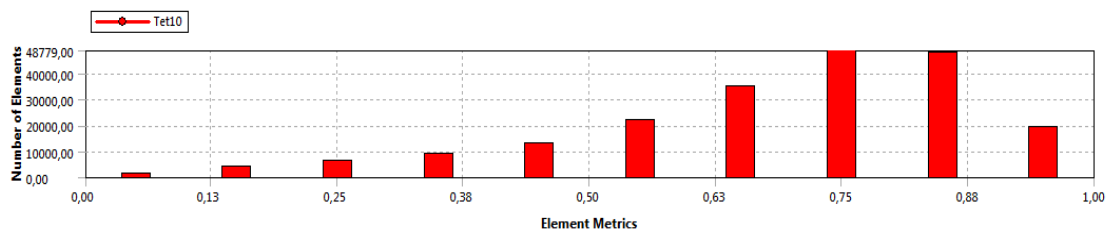


Figura 160: Histograma de Métrica de Malla Element Quality, modelo de 51,37% porosidad.

➤ Asimetría (“Skewness”)

Mesh Metric	Skewness
Min	2,0853e-004
Max	1,
Average	0,35713
Standard Deviation	0,21391

Figura 161: Estadística Métrica de Malla Skewness, modelo de 51,37% porosidad.

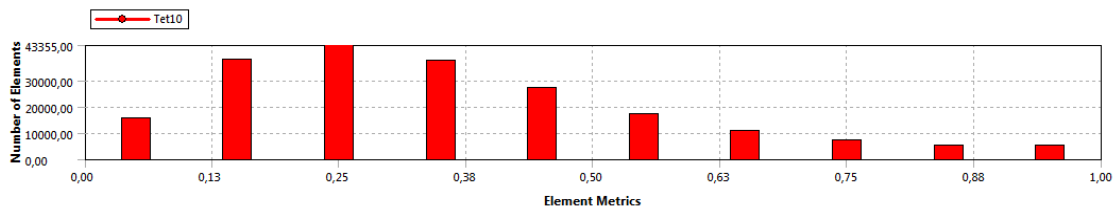


Figura 162: Histograma de Métrica de Malla Skewness, modelo de 51,37% porosidad.

➤ Jacobiano

Mesh Metric	Jacobian Ratio
☐ Min	-100,
☐ Max	13827
☐ Average	0,69481
☐ Standard Deviation	53,581

Figura 163: Estadística Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 51,37%% porosidad.

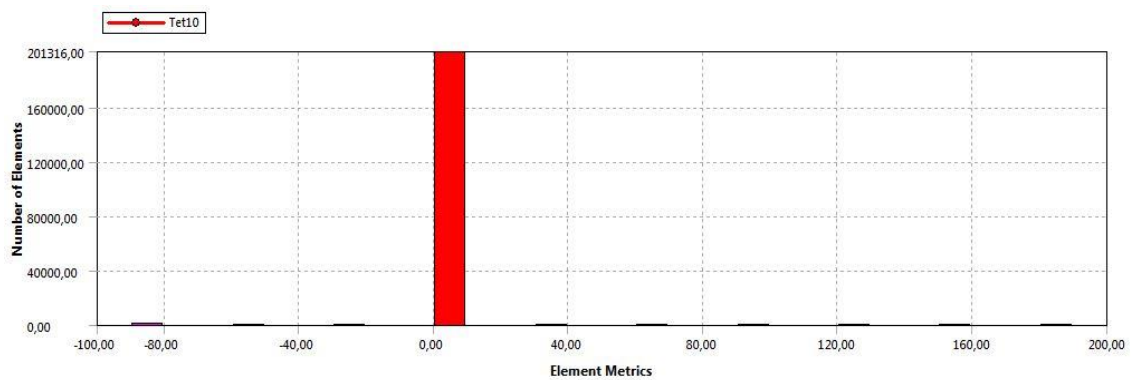


Figura 164: Histograma de Métrica de Malla Jacobian Ratio, modelo de 51,37% porosidad.

Se tiene un porcentaje de 0,6% de Jacobian negativos en el total de todos los elementos calculados.