



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA
Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO AXIAL DE ELASTÓMEROS MAGNETOREOLÓGICOS.

ROBERTO HERREROS CASTRO

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
JUAN CARLOS DE LA LLERA MARTIN

Santiago de Chile, enero 2014

© MMXIII, ROBERTO HERREROS CASTRO



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA
Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO AXIAL DE ELASTÓMEROS MAGNETOREOLÓGICOS.

ROBERTO HERREROS CASTRO

Miembros del Comité:

JUAN CARLOS DE LA LLERA MARTIN

DIEGO LÓPEZ-GARCÍA GONZÁLEZ

ANDRÉ CÔTÉ

JUAN DE DIOS RIVERA AGÜERO

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, enero 2014

© MMXIII, ROBERTO HERREROS CASTRO

A mis padres

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiese sido posible sin la colaboración de muchas personas o instituciones. Me gustaría agradecer a Fondef, que a través del proyecto D07I1006 fue un aporte fundamental para este proyecto. A Wier Minerals por medio del laboratorio de elastómeros de Vulco y de su Ingeniero a cargo, don Mario Bertrán, que fueron invaluableles en el desarrollo de esta investigación aportando su experiencia e instalaciones. Por otra parte, a los profesores Juliano Denardin del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile y Roberto Rodríguez de la Facultad de Física de la Pontificia Universidad Católica, quienes entregaron información crítica para los ensayos de este trabajo. A los profesores del Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica de la Pontificia Universidad Católica, en especial a Diego López-García, por su trabajo en mi formación como ingeniero. A mis compañeros de estudios, sobre todo a María del Pilar Gajardo, Santiago Brunet, Javier Pardo y Felipe Quitral por toda su ayuda en los años de estudio, de tesis y de vida. A mi familia, en particular a mis padres, Andrés y Cecilia, por su incansable aliento y soporte. Finalmente, un reconocimiento especial para mi profesor supervisor Juan Carlos de la Llera, por la oportunidad de trabajar con él y sin quien esta investigación nunca se hubiese llevado a cabo.

Índice General

Agradecimientos	IV
Lista de Figuras	VIII
Lista de Tablas	XIV
Resumen	XVI
Abstract	XVIII
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Elastómeros magnetoreológicos	1
1.2. Base teórica	3
1.2.1. Caracterización mecánica de un elastómero	3
1.2.2. Fundamentos de magnetismo	4
Capítulo 2. Materiales elastoméricos magnetoreológicos	7
2.1. Descripción general	7
2.2. MRE desarrollados	8
Capítulo 3. Ensayos realizados	12
3.1. Elementos	12
3.1.1. Probetas	12
3.1.2. Vástagos	13
3.2. Montaje experimental	14
3.2.1. Bobina	15
3.2.2. Marco de carga y parámetros de ensayo	17
Capítulo 4. Resultados de los ensayos	18
4.1. Pasivos	18
Módulo de almacenamiento (E')	18

Módulo de pérdida (E'')	21
Factor de pérdida (η)	23
4.2. Condición bajo campo magnético	24
4.2.1. Módulo de almacenamiento(E')	25
4.2.2. Módulo de pérdida(E'')	25
4.2.3. Factor de pérdida(η)	26
4.2.4. Pretensión (ΔF)	36
Capítulo 5. Relación constitutiva fuerza-deformación variable	39
5.1. Máximo amortiguamiento	40
5.2. Máxima rigidez	41
Capítulo 6. Investigación futura	43
Capítulo 7. Conclusiones	44
Bibliografía	45
ANEXO A. Curvas de respuesta pasiva	47
A.1. G1	47
A.2. G2	48
A.3. G3	49
ANEXO B. Curvas de respuesta activa	50
B.1. G125I	50
B.2. G125M	51
B.3. G130I	52
B.4. G130M	53
B.5. G225I	54
B.6. G225M	55
B.7. G230I	56
B.8. G230M	57
B.9. G325I	58

B.10.	G325M	59
B.11.	G330I	60
B.12.	G330M	61
ANEXO C.	Curvas de variación de parámetros	62
C.1.	Módulo de almacenamiento E'	62
C.2.	Módulo de pérdida E''	74
C.3.	Módulo de pérdida η	86

Lista de Figuras

1.1.	Generación de un campo magnético.	5
1.2.	Magnetización de un material.	6
2.1.	Tamizado partículas	10
3.1.	Detalle probeta	13
3.2.	Detalle del vástago	13
3.3.	Montaje experimental	14
3.4.	Características Bobina	15
3.5.	Propiedades magnéticas de la bobina y MRE	16
3.6.	Circuito magnético	16
4.1.	Ciclo pasivo de fuerza-deformación para elastómero G1 a 1hz y 1 % de defor- mación	18
4.2.	Resultados del elastómero G130I a 0.1 Hz, 1 % de deformación y campo magnético H	25
4.3.	Variación del incremento de pretensión ΔF en el elastómero G1.	37
4.4.	Variación del incremento de pretensión ΔF en el elastómero G2.	38
4.5.	Variación del incremento de pretensión ΔF en el elastómero G3.	38
5.1.	Posibles constitutivas fuerza-deformación del compuesto G130I.	39
5.2.	Curva con máxima energía disipada para G130I a 0.1 Hz y deformación de 1 %. 40	
5.3.	Curva con máxima rigidez posible para G130I, frecuencia 0.1 Hz y deforma- ción máxima 1 %.	42
A.1.	Resultados pasivos G1 a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	47
A.2.	Resultados pasivos G1 a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	47
A.3.	Resultados pasivos G1 a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	47
A.4.	Resultados pasivos G2 a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	48

A.5.	Resultados pasivos G2 a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	48
A.6.	Resultados pasivos G2 a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	48
A.7.	Resultados pasivos G3 a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	49
A.8.	Resultados pasivos G3 a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	49
A.9.	Resultados pasivos G3 a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	49
B.1.	Resultados activos G125I a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	50
B.2.	Resultados activos G125I a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	50
B.3.	Resultados activos G125I a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	50
B.4.	Resultados activos G125M a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	51
B.5.	Resultados activos G125M a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	51
B.6.	Resultados activos G125M a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	51
B.7.	Resultados activos G130I a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	52
B.8.	Resultados activos G130I a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	52
B.9.	Resultados activos G130I a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	52
B.10.	Resultados activos G130M a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	53
B.11.	Resultados activos G130M a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	53
B.12.	Resultados activos G130M a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	53
B.13.	Resultados activos G225I a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	54
B.14.	Resultados activos G225I a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	54
B.15.	Resultados activos G225I a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	54
B.16.	Resultados activos G225M a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	55
B.17.	Resultados activos G225M a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	55
B.18.	Resultados activos G225M a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	55
B.19.	Resultados activos G230I a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	56
B.20.	Resultados activos G230I a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	56
B.21.	Resultados activos G230I a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	56
B.22.	Resultados activos G230M a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	57
B.23.	Resultados activos G230M a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	57
B.24.	Resultados activos G230M a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	57

B.25.	Resultados activos G325I a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	58
B.26.	Resultados activos G325I a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	58
B.27.	Resultados activos G325I a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	58
B.28.	Resultados activos G325M a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	59
B.29.	Resultados activos G325M a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	59
B.30.	Resultados activos G325M a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	59
B.31.	Resultados activos G330I a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	60
B.32.	Resultados activos G330I a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	60
B.33.	Resultados activos G330I a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	60
B.34.	Resultados activos G330M a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	61
B.35.	Resultados activos G330M a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	61
B.36.	Resultados activos G330M a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.	61
C.1.	E' para G1 a 0kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	62
C.2.	E' para G1 a 43kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	62
C.3.	E' para G1 a 86kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	62
C.4.	E' para G1 a 130kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	63
C.5.	E' para G1 a 0kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	63
C.6.	E' para G1 a 43kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	63
C.7.	E' para G1 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	64
C.8.	E' para G1 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	64
C.9.	E' para G1 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	64
C.10.	E' para G1 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	65
C.11.	E' para G1 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	65
C.12.	E' para G2 a 0kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	66
C.13.	E' para G2 a 43kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	66
C.14.	E' para G2 a 86kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	66
C.15.	E' para G2 a 130kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	67
C.16.	E' para G2 a 0kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	67
C.17.	E' para G2 a 43kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	67

C.18.	E' para G2 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	68
C.19.	E' para G2 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	68
C.20.	E' para G2 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	68
C.21.	E' para G2 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	69
C.22.	E' para G2 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	69
C.23.	E' para G3 a 0kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	70
C.24.	E' para G3 a 43kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	70
C.25.	E' para G3 a 86kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	70
C.26.	E' para G3 a 130kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	71
C.27.	E' para G3 a 0kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	71
C.28.	E' para G3 a 43kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	71
C.29.	E' para G3 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	72
C.30.	E' para G3 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	72
C.31.	E' para G3 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	72
C.32.	E' para G3 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	73
C.33.	E' para G3 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	73
C.34.	E'' para G1 a 0kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	74
C.35.	E'' para G1 a 43kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	74
C.36.	E'' para G1 a 86kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	74
C.37.	E'' para G1 a 130kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	75
C.38.	E'' para G1 a 0kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	75
C.39.	E'' para G1 a 43kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	75
C.40.	E'' para G1 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	76
C.41.	E'' para G1 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	76
C.42.	E'' para G1 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	76
C.43.	E'' para G1 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	77
C.44.	E'' para G1 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	77
C.45.	E'' para G2 a 0kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	78
C.46.	E'' para G2 a 43kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	78

C.47.	E'' para G2 a 86kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	78
C.48.	E'' para G2 a 130kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	79
C.49.	E'' para G2 a 0kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	79
C.50.	E'' para G2 a 43kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	79
C.51.	E'' para G2 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	80
C.52.	E'' para G2 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	80
C.53.	E'' para G2 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	80
C.54.	E'' para G2 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	81
C.55.	E'' para G2 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	81
C.56.	E'' para G3 a 0kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	82
C.57.	E'' para G3 a 43kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	82
C.58.	E'' para G3 a 86kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	82
C.59.	E'' para G3 a 130kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	83
C.60.	E'' para G3 a 0kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	83
C.61.	E'' para G3 a 43kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	83
C.62.	E'' para G3 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	84
C.63.	E'' para G3 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	84
C.64.	E'' para G3 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	84
C.65.	E'' para G3 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	85
C.66.	E'' para G3 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	85
C.67.	η para G1 a 0kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	86
C.68.	η para G1 a 43kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	86
C.69.	η para G1 a 86kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	86
C.70.	η para G1 a 130kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	87
C.71.	η para G1 a 0kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	87
C.72.	η para G1 a 43kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	87
C.73.	η para G1 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	88
C.74.	η para G1 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	88
C.75.	η para G1 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	88

C.76.	η para G1 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	89
C.77.	η para G1 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	89
C.78.	η para G2 a 0kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	90
C.79.	η para G2 a 43kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	90
C.80.	η para G2 a 86kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	90
C.81.	η para G2 a 130kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	91
C.82.	η para G2 a 0kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	91
C.83.	η para G2 a 43kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	91
C.84.	η para G2 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	92
C.85.	η para G2 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	92
C.86.	η para G2 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	92
C.87.	η para G2 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	93
C.88.	η para G2 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	93
C.89.	η para G3 a 0kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	94
C.90.	η para G3 a 43kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	94
C.91.	η para G3 a 86kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	94
C.92.	η para G3 a 130kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	95
C.93.	η para G3 a 0kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	95
C.94.	η para G3 a 43kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	95
C.95.	η para G3 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	96
C.96.	η para G3 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.	96
C.97.	η para G3 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	96
C.98.	η para G3 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	97
C.99.	η para G3 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.	97

Lista de Tablas

2.1.	Matrices elastoméricas	9
2.2.	Composición de las partículas	9
2.3.	Mezclas de MRE	10
2.4.	Costo de MRE en US\$/L	11
4.1.	Módulo de almacenamiento E' para elastómero G1	20
4.2.	Módulo de almacenamiento E' para elastómero G2	20
4.3.	Módulo de almacenamiento E' para elastómero G3	21
4.4.	Módulo de pérdida E'' para elastómero G1	22
4.5.	Módulo de pérdida E'' para elastómero G2	22
4.6.	Módulo de pérdida E'' para elastómero G3	22
4.7.	Factor de pérdida η para elastómero G1	23
4.8.	Factor de pérdida η para elastómero G2	24
4.9.	Factor de pérdida η para elastómero G3	24
4.10.	Módulo de almacenamiento E' en matriz elastomérica G1 bajo campo magnético.	27
4.11.	Módulo de almacenamiento E' en matriz elastomérica G2 bajo campo magnético.	28
4.12.	Módulo de almacenamiento E' en matriz elastomérica G3 bajo campo magnético.	29
4.13.	Módulo de pérdida E'' en matriz elastomérica G1 bajo campo magnético.	30
4.14.	Módulo de pérdida E'' en matriz elastomérica G2 bajo campo magnético.	31
4.15.	Módulo de pérdida E'' en matriz elastomérica G3 bajo campo magnético.	32
4.16.	Factor de pérdida η en matriz elastomérica G1 bajo campo magnético.	33
4.17.	Factor de pérdida η en matriz elastomérica G2 bajo campo magnético.	34
4.18.	Factor de pérdida η en matriz elastomérica G3 bajo campo magnético.	35

5.1.	Propiedades del elastómero para máximo amortiguamiento	41
5.2.	Propiedades del elastómero para máxima rigidez	42

RESUMEN

Los elastómeros magnetoreológicos (MRE) son materiales compuestos por una matriz elastomérica con partículas de hierro micrométricas en su interior y en proporciones de 5 % a 35 % en volumen. De acuerdo a resultados de la literatura estos materiales son capaces de modificar su rigidez y amortiguamiento directamente en presencia de un campo magnético.

En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos del ensayo de 12 probetas de MRE construidas en base a tres matrices elastoméricas y dos tipos de partículas en dos concentraciones distintas. Cada probeta se ensaya para distintas excitaciones sinusoidales en presencia de campos magnéticos de intensidades en el rango de 0 a 130 kA/m .

Los resultados obtenidos para los MRE desarrollados no presentan cambios directos de rigidez y amortiguamiento interno en presencia de un campo magnético, pero sí presentan un fenómeno de desplazamiento de la relación constitutiva fuerza-deformación paralelamente hacia la zona de tracciones, es decir, equivale a una pretensión del material.

Debido a este nuevo comportamiento, la relación constitutiva fuerza- deformación del MRE deja de ser una curva única dependiente de las propiedades del material y de la sollicitación, y se transforma en una curva que es controlable de acuerdo a las necesidades del sistema y características de la excitación. Dependiendo del sistema de control utilizado, se puede modificar su rigidez, su amortiguamiento, o ambos, de acuerdo a los requerimientos de diseño.

Las posibles aplicaciones de un material con esta versatilidad son variadas. Específicamente, en el área de los sistemas de reducción de vibraciones, los usos potenciales más interesantes se orientan a generar sistemas de pequeña escala, por ahora, que puedan alejarse de la resonancia modificando su rigidez.

La factibilidad de las aplicaciones está limitada por la escala que aún se encuentra en rangos de fuerza y deformación pequeños, en este trabajo, el rango de fuerzas va entre 8 y 100 kgf y las deformaciones axiales de los elastómeros no superan los $3,6\text{ mm}$. Sin embargo, existen diversas

alternativas que se discuten en este trabajo para seguir avanzando en el estudio de los MRE y su comportamiento.

Palabras Claves: MRE, MRE Axial, Rigidez Variable, Amortiguamiento Variable, Constitutiva Variable.

ABSTRACT

Magnetorheological elastomers (MRE) are composite materials with an elastomeric matrix filled with micro-sized iron particles. Results from the literature, show that they are capable of modifying their internal damping and stiffness in presence of a magnetic field.

This research work presents the results obtained from cyclic tests of 12 specimens of MRE made with 3 different elastomeric matrices, two types of particles, and two different concentrations. Each specimen was tested with sinusoidal excitations in the presence of different magnetic fields.

It is clear that the developed MRE's do not present a direct change in stiffness and internal damping when subjected to a magnetic field. Instead, the force-deformation constitutive relationship is prestressed and shifts toward the tension zone.

This new observed behavior turns the MRE constitutive relationship from a fixed curve by material and excitation properties into a controllable curve according to system and excitation needs. Depending on the control system and requirements, rigidity, damping or both may be changed.

Such a versatile material may have several applications. In vibration reduction systems, the most interesting uses are resonance control systems, where natural frequencies are modified to move away from resonance and systems that can be re-calibrated according to variations on the excitation, or the protected structure.

Feasibility of applications is limited by the MRE's capacity that is still restricted to a small force and deformation ranges. However, it is apparent that there are many possibilities to improve MRE's behavior.

Keywords: MRE, Axial MRE, Variable Stiffness, Variable Damping, Variable Constitutive.

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Elastómeros magnetoreológicos

Los elastómeros magnetoreológicos o MRE por su sigla en inglés (Magneto-rheological Elastomers), son miembros de la familia de los llamados materiales inteligentes, que son capaces de modificar sus propiedades en tiempo real como respuesta a ciertos estímulos externos. Otros materiales que componen esta familia son los fluidos magnetoreológicos (Ashour et al., 1996), los materiales con memoria de forma tales como el Nitinol (Wayman, 1993) y otros.

Los MRE son materiales compuestos por una matriz elastomérica y partículas de hierro en suspensión de tamaños que varía entre 2 y 200 μm , que son capaces de modificar su rigidez y amortiguamiento en presencia de un campo magnético. En general, las variaciones de rigidez y amortiguamiento se producen de forma conjunta. La posibilidad de modificar estas propiedades, los hace materiales propicios para utilizarlos en el campo de la reducción de vibraciones, en que es necesario ajustar las propiedades del sistema en tiempo real para optimizar su respuesta en base a condiciones variables de la entrada o a condiciones que no es posible predecir en la etapa de diseño.

En la literatura se abarca mayormente el estudio del efecto magnetoreológico en probetas sometidas a esfuerzos de corte, con el campo magnético orientado en forma transversal a la sollicitación mecánica. Investigaciones realizadas en el Insitituto Fraunhofer en Alemania (Böse, 2007; Böse y Röder, 2009), indican un aumento de hasta 90 veces en la rigidez para probetas de silicona blanda, con partículas de hierro de forma irregular con un tamaño de 40 μm concentradas al 30 % y vulcanizadas en presencia de campo magnético. La existencia de un campo magnético en el proceso de curado, hace que las partículas de hierro en el interior de la matriz elatomérica se alinien y formen cadenas que aumentan la respuesta magnetoreológica del material.

Por otro lado, trabajos llevados a cabo en Suecia (Lokander y Stenberg, 2003a,b), presentan aumentos de un 7 % en rigidez utilizando una matriz de silicona de dureza intermedia y partículas de hierro irregulares con un tamaño de 60 μm y concentradas al 30 %.

También existen algunos estudios sobre MRE sometidos a esfuerzos axiales con campo magnético orientado longitudinalmente a lo largo de la probeta. En este caso destaca la investigación realizada en VTT (Kallio et al., 2007), donde utilizando probetas con matriz elastomérica de dureza intermedia y partículas de hierro de forma regular y de $5\mu m$ de diámetro y concentradas al 30 %, reporta aumentos en la rigidez de alrededor de 10.9 % y del amortiguamiento interno en un 18.5 %, para probetas vulcanizadas en presencia de un campo magnético.

De los diversos casos que se encuentran en la literatura, se desprende que una de las mayores complejidades de trabajar con elastómetros magnetoreológicos radica en generar y confinar un campo magnético intenso (superior a 1 Tesla) en un espacio suficientemente grande. Para los casos de estudio en corte, suele trabajarse con láminas delgadas de materiales MRE, lo que permite un mayor campo magnético y a su vez una mayor variación en rigidez. En el caso de una acción axial, las probetas requieren ser de mayor volumen y recibir el mismo campo en un espacio más grande, lo que es más costoso a nivel energético.

Además de resultados experimentales, se han publicado algunos modelos analíticos (Jolly et al., 1996; Davis, 1999; Ivaneyko et al., 2011). Estos modelos se ajustan a MRE vulcanizados en presencia de campo magnético para que las partículas de hierro queden alineadas al interior de la matriz (anisotrópicos), pero dichos modelos no son precisos en reproducir el comportamiento de los MRE isotrópicos.

El curado del elastómero en presencia de campo magnético es una tarea compleja de realizar, ya que no es posible colocar un electroimán dentro de la prensa donde se realiza la vulcanización del elastómero. Para lograr este efecto se utilizan elastómeros que vulcanizan en presencia de aire usando ciertos aceleradores, pero el proceso no tiene los mismos niveles de confiabilidad que el proceso de vulcanizado bajo presión y temperatura.

En cuanto a aplicaciones de elastómeros MR, no existen demasiadas, ya que la generación de campos magnéticos de alta intensidad en espacios grandes es compleja y costosa. Por otro lado, la utilización de sistemas con materiales inteligentes, requiere procesos de control automático en tiempo real que son más sofisticados y cuentan con sistemas de medición precisos para alimentar al control.

En este trabajo, se estudian elastómeros magnetoreológicos isotrópicos, cargados axialmente con campo magnético en la misma dirección del esfuerzo axial. Las probetas utilizadas en este estudio son de mayor tamaño a las presentadas previamente en la literatura; el objetivo es conocer su versatilidad para variar rigidez y amortiguamiento frente a distintas intensidades del campo magnético.

Esta tesis incluye una breve reseña teórica de conceptos de elasticidad y magnetismo. Luego se describe el ensayo realizado y las probetas utilizadas. Además se incluye un análisis de los resultados experimentales, contrastados con aquellos provenientes del estado del arte. Finalmente se proponen aplicaciones factibles en base a los resultados obtenidos y próximos los pasos para avanzar en esta investigación.

1.2. Base teórica

Esta sección describe algunos conceptos básicos de comportamiento mecánico de los elastómeros y de magnetismo para poder entender de mejor manera el enfoque utilizado y los resultados obtenidos. Por el lado mecánico, se describen los parámetros fundamentales para caracterizar linealmente un elastómero y que se utilizarán más adelante para analizar los resultados experimentales. En relación al magnetismo, se analizan dos temas básicos, la generación de un campo magnético a partir de una bobina y la magnetización de un elemento en presencia de un campo magnético.

1.2.1. Caracterización mecánica de un elastómero

La relación constitutiva fuerza-deformación de un sistema viscoelástico lineal para una excitación armónica de amplitud máxima u_0 se puede expresar en función de los módulos de almacenamiento y pérdida del material, $S(\omega)$ y $L(\omega)$, mediante la siguiente expresión (Soong T.T., 1997)

$$f(t) = S(\omega)u(t) + L(\omega)u_0\sqrt{1 - \left(\frac{u(t)}{u_0}\right)^2} \quad (1.1)$$

Esta relación constitutiva fuerza-deformación del material viscoelástico corresponde geométricamente a una elipse con su eje rotado en sentido contrario a los punteros del reloj. Si el material fuera puramente elástico, su representación sería una recta con pendiente $S(\omega)$ y si fuera puramente viscoso, la elipse estaría orientada sobre el eje horizontal.

De la relación constitutiva fuerza-deformación obtenida se pueden extraer tres parámetros que caracterizan el material: E' , E'' y η . El primero es el módulo de almacenamiento ($S(\omega)$ o E') y corresponde a la rigidez del sistema o equivalentemente a la parte real de la función de transferencia del sistema lineal $H(j\omega)$ generando una fuerza proporcional a la deformación $u(t)$. El segundo es el módulo de pérdida ($L(\omega)$ o E''), que corresponde a la parte disipativa del material o equivalentemente a la parte imaginaria de la función de transferencia del sistema lineal. $L(\omega)$ es geoméricamente una medida de la excentricidad de la elipse; el tercero es el factor de pérdida ($\tan(\delta)$ o η) que corresponde al cociente entre E''/E' o equivalentemente a la tangente de la fase de la función de transferencia. Es proporcional al amortiguamiento del sistema lineal y corresponde al doble del amortiguamiento interno del material, es decir $\eta = 2\xi$

1.2.2. Fundamentos de magnetismo

1.2.2.1. Campo magnético de una bobina

Un campo magnético se genera a partir del movimiento de una partícula cargada eléctricamente. Cuando la partícula se mueve en línea recta, las líneas de campo magnético forman círculos concéntricos que disminuyen en intensidad al alejarse (Figura 1.1 a). Si la corriente circula a lo largo de una espira, las líneas de campo son círculos en un plano transversal de la sección del conductor (Figura 1.1 b). Como una bobina está compuesta por un conjunto de espiras, el campo magnético de la bobina corresponde a la sumatoria de los campos de las espiras individuales (Figura 1.1 c). En este caso, se observa que el campo tiende a uniformarse al interior del núcleo de la bobina, lo que hace de este espacio uno propicio para realizar estudios magnéticos.

Las líneas de campo magnético siempre se cierran, es por esto que cuando las líneas pasan por medios de baja permeabilidad magnética, como el aire, baja la intensidad del campo

generado por la bobina. Por el contrario, si las líneas pasan por medios de alta permeabilidad magnética, como el hierro, la intensidad del campo magnético es más alta, ya que se facilita que las líneas de campo magnético se cierren sobre sí mismas.

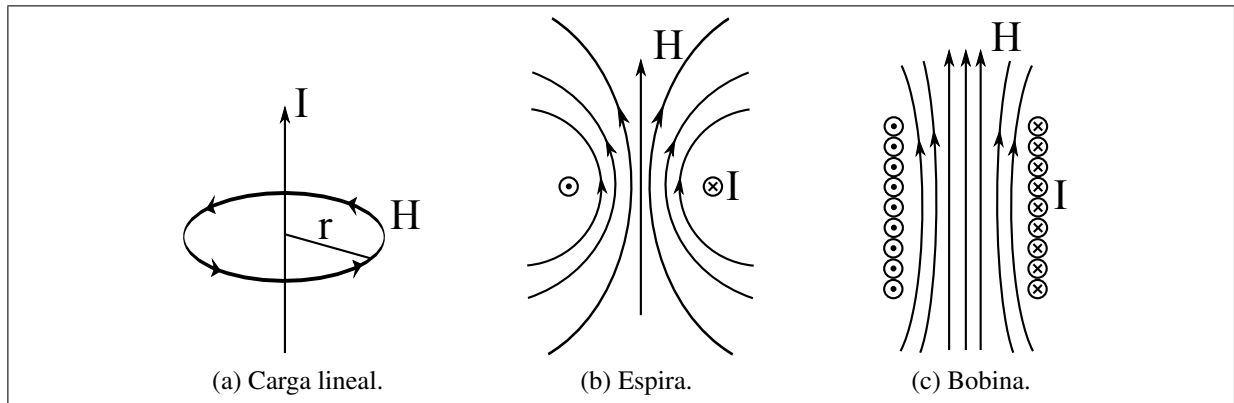


Figura 1.1: Generación de un campo magnético.

1.2.2.2. Magnetización de un material

Los materiales en estado magnéticamente neutro, tienen todos sus dipolos magnéticos internos orientados de forma aleatoria, de tal manera que el campo magnético total que producen es nulo (Figura 1.2 a). Sin embargo, en los materiales ferromagnéticos, los dipolos magnéticos internos tienden a orientarse en la dirección del campo magnético externo aplicado (Figura 1.2 b), otorgándole al material ferromagnético un cierto nivel de magnetización. Esta reorientación de los dipolos puede ser reversible o permanente. Los electroimanes son un ejemplo del primer caso, mientras que los imanes permanentes son un ejemplo del segundo.

Mientras mayor sea el campo magnético externo aplicado, más alto es el nivel de magnetización del material. El límite de magnetización se conoce como magnetización de saturación (M_s) y corresponde al nivel en que todos los dipolos se orientan perfectamente con el campo externo aplicado.

La estructura de los elastómeros MR, donde la matriz elastomérica no se magnetiza y contiene partículas de material ferromagnético en su interior, hace que cada partícula tienda a magnetizarse y la interacción magnética entre ellas produzca el efecto magnetoreológico.

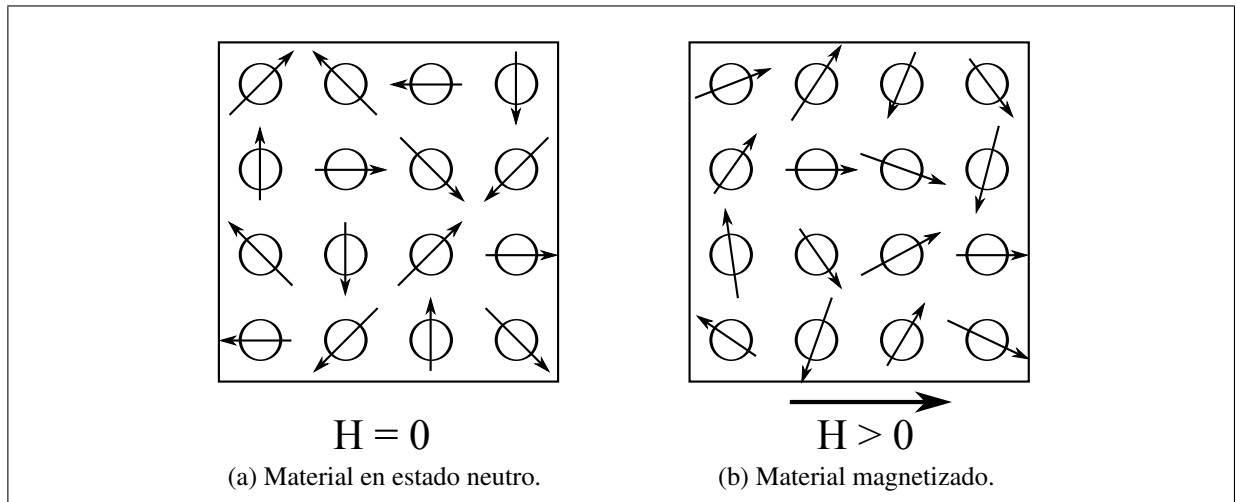


Figura 1.2: Magnetización de un material.

Capítulo 2. MATERIALES ELASTOMÉRICOS MAGNETOREOLÓGICOS

2.1. Descripción general

En la literatura existen variados trabajos sobre elastómeros MR, con los que se puede hacer una caracterización mecánica en cuanto a capacidades y requerimientos. Esta descripción se puede dividir de acuerdo al tipo de carga aplicada, corte o tracción-compresión.

Dentro de las investigaciones enfocadas en MRE sometidos a esfuerzos de corte, existen dos grupos importantes, el primero del Instituto Fraunhofer en Alemania, a cargo de H. Böse y el segundo, de KTH en Suecia, a cargo de M. Lokander y B. Stenberg. Los trabajos de Böse (Böse y Röder, 2009; Böse, 2007) se realizan en un reómetro Paar-Physica MCR 300 equipado con una unidad de medición magnetoreológica. Dadas las características de dicho sistema de ensayos donde la probeta de goma ensayada tiene un espesor muy pequeño, se pueden realizar ensayos con campos magnéticos de gran magnitud (hasta 700 mT).

Sus trabajos se realizan sobre MRE con matrices elastoméricas de silicona, donde se modifica el tipo de partícula y su concentración. El primer tipo de partículas, CIP, corresponde a polvo fino, de $5\mu\text{m}$ de diámetro y forma regular, mientras que el segundo es de $40\mu\text{m}$ de diámetro y forma irregular, ambos son de hierro. Para cada partícula se fabrican probetas con 0, 10, 20, 30 y 35 % de concentración en volumen.

Otro parámetro estudiado en este trabajo es la presencia de un campo magnético en el proceso de vulcanizado. Para poder evaluar esto, todas las probetas descritas previamente tienen una versión curada en presencia de campo magnético y otra vulcanizada sin campo magnético. Cada probeta se somete a una deformación de un 1 % de amplitud con una frecuencia de 10 hz. Con estos parámetros, los autores concluyen que los mejores resultados se obtienen con las partículas de mayor tamaño y para las probetas vulcanizadas en presencia de campo magnético y con concentración de partículas de un 30 %. En el caso más favorable, la rigidez del compuesto aumenta en un factor de 90.

La investigación del grupo de KTH (Lokander y Stenberg, 2003a,b), también somete las probetas a esfuerzos de corte, pero no utiliza un reómetro, sino un marco de carga en un sólo

eje Instron modelo 8032, equipado con un electroimán. En este caso el espesor de las probetas es de 2 mm. y el campo magnético aplicado es constante e igual a 240 mT . No hay probetas vulcanizadas en presencia de campo magnético. Los autores utilizan 4 tipos de partículas, el primero CIP y los otros tres corresponden a partículas de hierro irregulares de 60, 180 y $200\mu\text{m}$ de diámetro, en concentraciones de 0 a 50 %. También incluyen 4 tipos de matrices elastoméricas de distinta dureza.

Los resultados muestran que el mayor aumento de la rigidez se da también para concentraciones en volumen del 30 %. Las matrices elastoméricas no tienen influencia en el cambio de rigidez, pero al aumentar la rigidez basal de la matriz, hacen disminuir la variación relativa. Por su parte, las partículas irregulares de menor tamaño utilizadas ($60\mu\text{m}$) son las que generan mayor aumento de la rigidez, el que alcanza un 7 %.

Para el caso de MRE sometidos a esfuerzos de tracción-compresión existen menos trabajos; sin embargo, una investigación de VTT en Finlandia, a cargo de M. Kallio (Kallio et al., 2007), presenta experiencias y resultados interesantes. Los MRE desarrollados utilizan silicona de dureza intermedia auto-vulcanizante y partículas CIP en concentración de 30 %. También consideran el campo magnético en el proceso de vulcanizado, por lo que fabrican una probeta en presencia de campo magnético y otra en ausencia del mismo. El montaje experimental consiste en un marco de carga Instron modelo 82502 junto con una bobina de gran potencia que provee un campo magnético de hasta 890 mT .

Dado que en este caso la sollicitación mecánica ocurre en la misma dirección que la alineación de las partículas de la probeta vulcanizada en presencia de campo magnético, ésta tiene mejor desempeño que la probeta isotrópica. El aumento de la rigidez obtenido en este caso es de un 10.9 %, mientras que el aumento de amortiguamiento es de un 18.5 %.

2.2. MRE desarrollados

Considerando los parámetros utilizados en otros ensayos, este trabajo incluye 12 probetas distintas con 3 matrices elastoméricas, 2 tipos de partículas de hierro, y 2 concentraciones

diferentes. Por limitantes de fabricación las probetas fueron vulcanizadas bajo temperatura y presión, sin presencia de un campo magnético.

La Tabla 2.1 contiene las principales propiedades de los elastómeros utilizados, entre ellos dureza, módulo de corte y amortiguamiento. Estos dos últimos están calculados en base a una deformación de corte γ de un 150 %. Todos estos valores son entregados por el proveedor de las matrices elastoméricas. La composición de todas las matrices elastoméricas es similar. Sobre una base de caucho natural, se utilizan distintos niveles de carga de refuerzo con negro de humo y de plastificantes de aceites de petróleo, con lo que se regulan las propiedades indicadas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Matrices elastoméricas.

Elastómero	Shore A ¹	G(MPA)	ξ (%)
G1	35	3	6
G2	48	4	12
G3	65	8	12

Los tipos de partículas de hierro utilizados dentro de la matriz de goma son Iron325 y Magnetita. La primera corresponde a un polvo de hierro fino, reducido en hidrógeno, mientras que la segunda es un polvo de magnetita sintética de alta pureza. La composición química de ambas partículas se muestra en la Tabla 2.2; se observa que ambas partículas tienen una alta concentración del elemento principal, magnetita o hierro, y son de alta pureza.

Tabla 2.2: Composición de las partículas.

Magnetita		Iron325	
Magnetita (Fe_3O_4)	99 %	Hierro (Fe)	97.5 %
Hematita (Fe_2O_3)	0.5 %	Hidrógeno (H)	1.3 %
Elementos traza	0.5 %	Oxígeno (O)	1.0 %
		Elementos traza	0.2 %

La granulometría de las partículas se muestra en la Figura 2.1. Las partículas de magnetita concentran su tamaño entre 2 y $4\mu m$, mientras que las de Iron325 se concentran entre 0 y $44\mu m$. Entre ambos tipos de partículas surgen dos diferencias importantes. En primer lugar, el tamaño

de las partículas de magnetita es un orden de magnitud menor que las de Iron325. Por otra parte, las partículas de magnetita tienen una menor variabilidad en su tamaño que las de hierro.

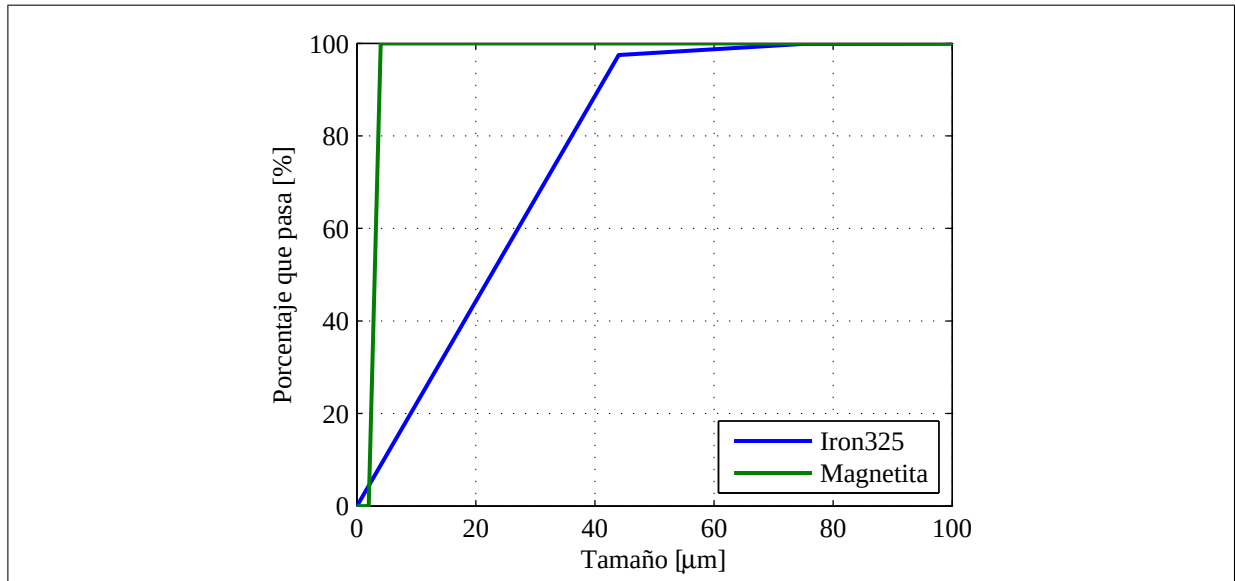


Figura 2.1: Tamizado de partículas.

Para nombrar las mezclas, se les asigna un nombre en base a sus componentes. Este nombre es de la forma GXYYZ, donde X es el identificador de la matriz elastomérica, YY corresponde a la concentración y Z identifica a las partículas, I para Iron325 y M para Magnetita. La Tabla 2.3 muestra todas las combinaciones utilizadas.

Tabla 2.3: Mezclas de MRE.

Partículas	Concentración	Matriz Elastomérica		
		G1	G2	G3
Iron325	25 %	G125I	G225I	G325I
	30 %	G130I	G230I	G330I
Magnetita	25 %	G125M	G225M	G325M
	30 %	G130M	G230M	G330M

El proceso de fabricación de los MRE es el mismo que el de los elastómeros corrientes, con la adición de un paso antes de la vulcanización, en que se añaden las partículas asegurando una distribución uniforme en la matriz. El primer paso es disolver en tolueno la cantidad de matriz elastomérica requerida hasta que quede suficientemente líquida de tal manera que se pueda

revolver utilizando un agitador. En este estado líquido se añade la cantidad correspondiente de partículas para lograr la concentración en volumen definida a priori.

Luego se debe evaporar todo el tolueno en un estado de agitación permanente para que las partículas no decanten y se mantenga la uniformidad e isotropía del material. Cuando se cumple este objetivo, se tiene el MRE crudo, equivalente a la matriz elastomérica utilizada al principio del proceso. Finalmente, el nuevo elastómero se vacía en un molde apropiado y se lleva a vulcanización con azufre durante 30 minutos a 150°C.

Los costos de producción de los MRE varían de acuerdo al tipo y concentración de las partículas y no en base a la matriz elastomérica. En la Tabla 2.4 se muestra una aproximación de los costos de producción de los MRE a gran escala. Se utilizan los precios de los empaques de mayor tamaño disponibles en el mercado. La unidad utilizada es US\$/L (dólares por litro), ya que al utilizar los MRE se vulcanizan en un molde donde la variable que controla es el volumen y no el peso. Destaca en la Tabla, que el costo de las gomas con magnetita duplican el valor de la matriz, mientras que las con Iron325 cuadruplican el costo original.

Tabla 2.4: Costo de MRE en US\$/L.

G1	G125I	G130I	G125M	G130M
9.5	41.7	48.2	21.3	24.2

Capítulo 3. ENSAYOS REALIZADOS

El objetivo de los ensayos es estudiar el comportamiento de diferentes mezclas de elastómeros magnetoreológicos, sometidos a esfuerzos de tracción-compresión al interior de un campo magnético. Para analizar la respuesta en este caso, el campo magnético debe orientarse en el mismo eje en el que se carga la muestra. El ensayo incluye las 12 probetas descritas en el capítulo previo, sometidas a esfuerzos axiales sinusoidales en 3 frecuencias y 3 amplitudes distintas. Cada una de las 9 combinaciones de amplitud y frecuencia se realiza bajo 4 campos magnéticos diferentes.

Para cada uno de los casos, se analizan módulo de almacenamiento (E'), módulo de pérdida (E'') y factor de pérdida (η). Estos valores entregan una caracterización del comportamiento mecánico de los elastómeros y permiten comparar el efecto magnetoreológico en los diferentes casos.

3.1. Elementos

3.1.1. Probetas

La Figura 3.1 muestra una de las probetas de goma. Es cilíndrica y tiene en cada una de sus caras redondas una tapa de acero (1020) que cumple una doble función, por un lado permite unirse al vástago y por otro, contribuye a uniformar el campo magnético en la goma. Para asegurar que las tapas de acero no se separen de la goma, se vulcanizan juntas, habiendo sometido las caras metálicas en contacto con el elastómero a un proceso de granallado, que genera una superficie rugosa que mejora la adhesión. Por el lado externo, las tuercas tienen un hilo, donde se atornilla el vástago.

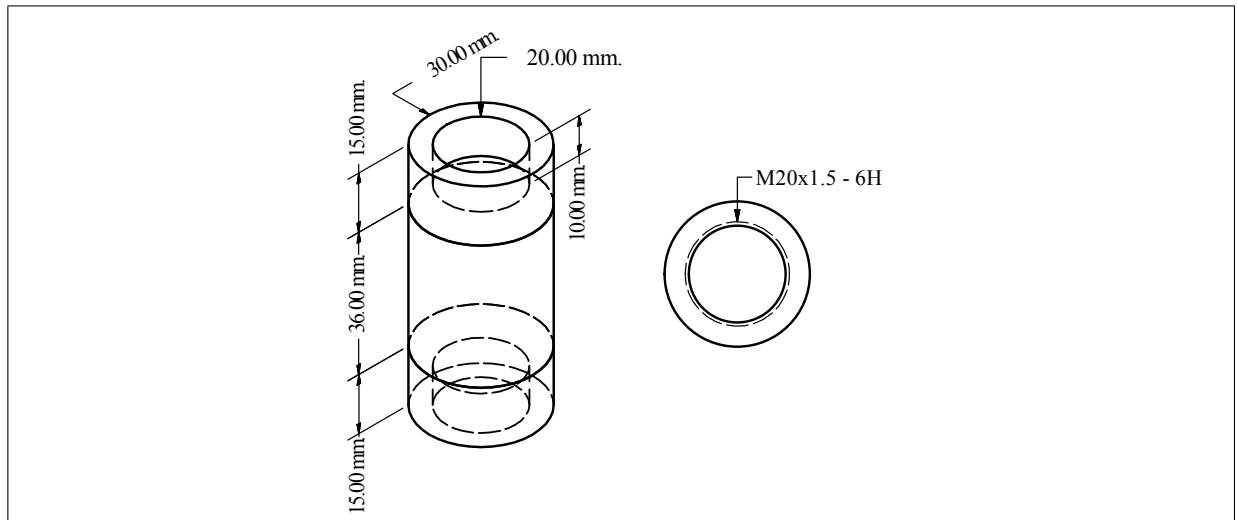


Figura 3.1: Detalle probeta de goma para ensayo de tracción - compresión.

3.1.2. Vástagos

Los vástagos detallados en la Figura 3.2 son de sección circular de radio variable y unen el marco de carga con la probeta transmitiendo los esfuerzos axiales. El tramo superior tiene una perforación horizontal que une vástago con el marco de carga mediante un pasador. El tramo siguiente tiene un hilo y una tuerca, con el fin de apretar la unión del tramo superior y evitar el movimiento que queda del pasador. A continuación le sigue una zona de transición cónica, donde disminuye la sección hasta llegar al segmento final que tiene un hilo $M20$, y que se une con la probeta. Ambos vástagos, superior e inferior son iguales.

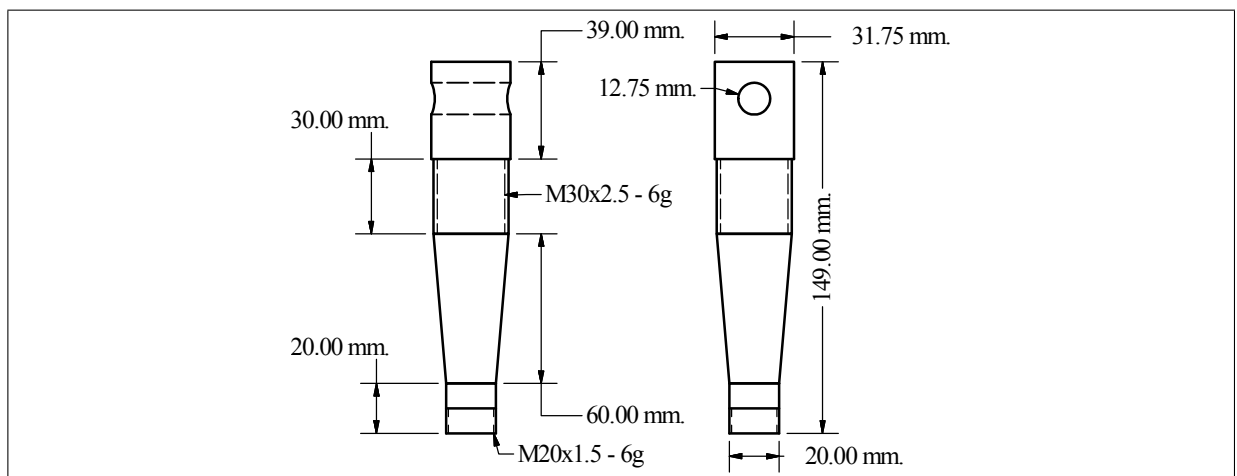


Figura 3.2: Detalle del vástago.

Para evitar flujos magnéticos en los vástagos, estos son de acero inoxidable austenítico (304), que no se magnetiza y tiene una rigidez 1000 veces más alta que la goma, por lo que su deformación se puede considerar despreciable.

3.2. Montaje experimental

El montaje experimental utilizado se observa en la Figura 3.3. Al centro se encuentra la bobina, en cuyo núcleo se ubica la probeta de MRE a ser ensayada. Por su parte, la probeta se une en cada extremo a un vástago de acero inoxidable. Al eje de la probeta se une la celda de carga (punto inferior), mientras que el punto superior se une al pistón que impone la historia de deformaciones. En cada ensayo se mide la relación constitutiva fuerza-deformación. El primer valor se obtiene a partir de la celda de carga ubicada en la parte inferior del marco de carga y la deformación la entrega la máquina a partir del movimiento del pistón superior.

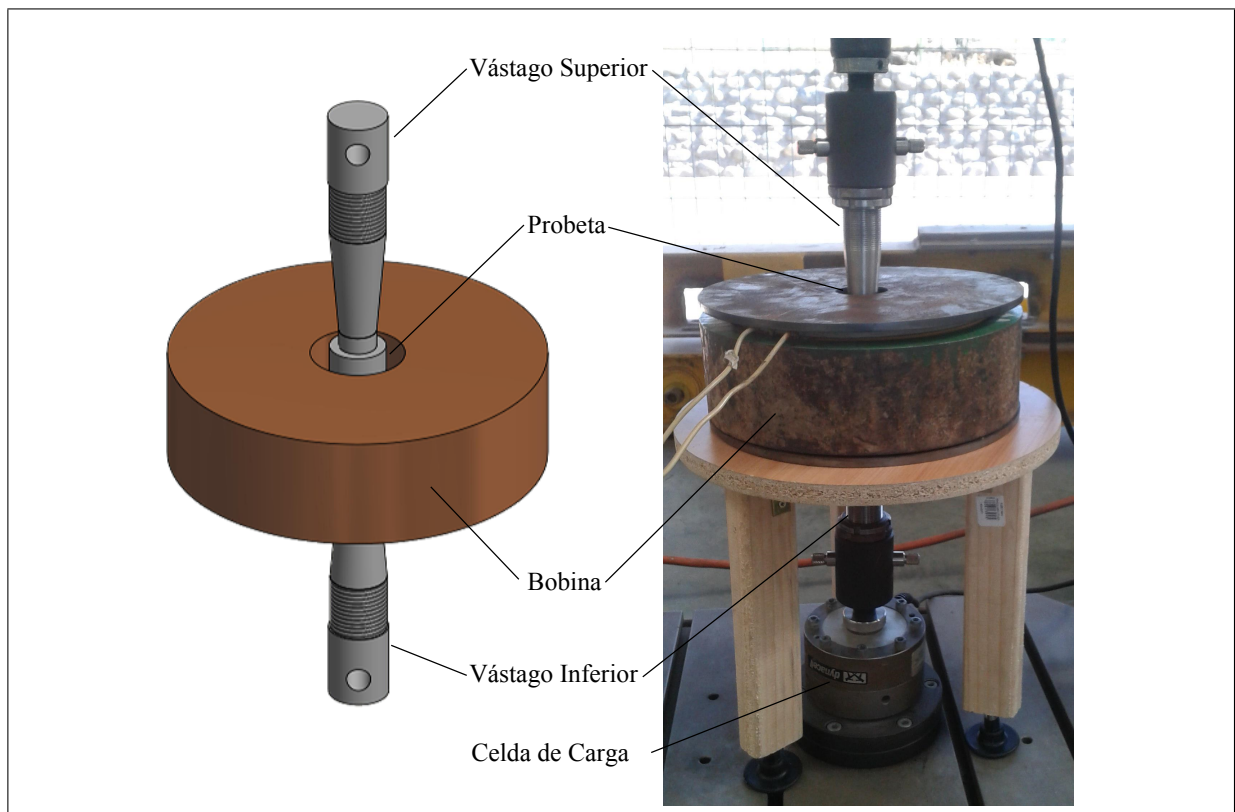


Figura 3.3: Montaje experimental.

3.2.1. Bobina

La intensidad de campo magnético producida es uno de los componentes más relevantes del ensayo ya que modifica el comportamiento de los elastómeros. Mientras más alto es el campo magnético, más pronunciada es la variación de la respuesta. Un detalle esquemático de la bobina que genera el campo magnético se muestra en la Figura 3.4. La bobina tiene 725 vueltas y está construida con cable esmaltado AWG#11, cuyo límite de corriente es de 15 A.

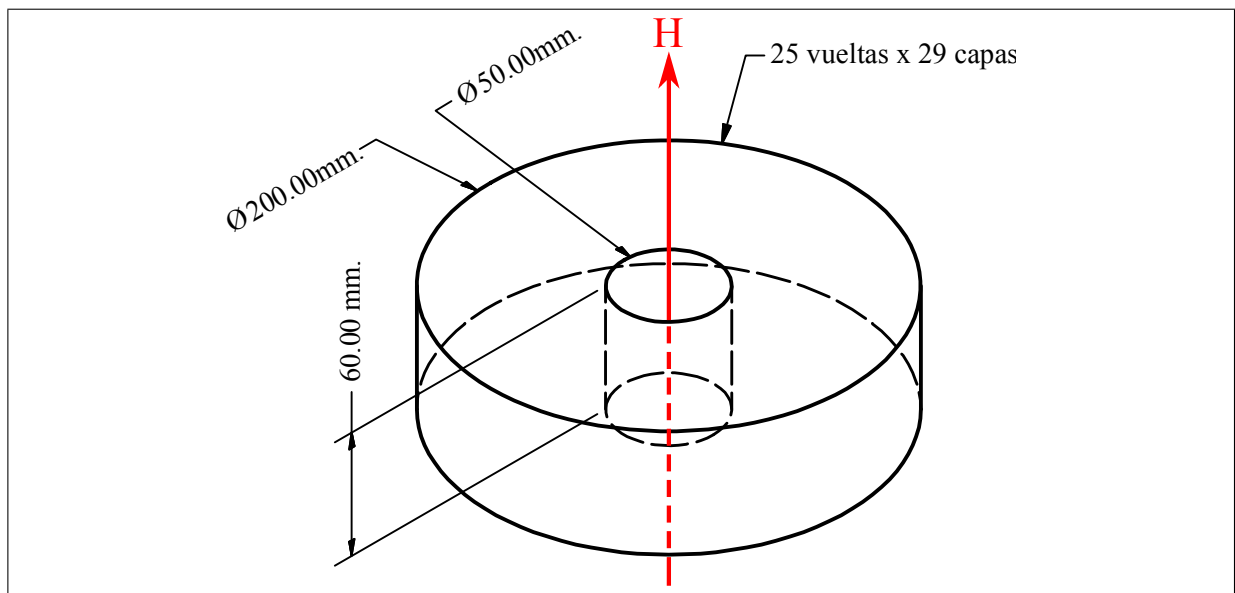


Figura 3.4: Características de la bobina seleccionada.

El campo generado a máxima corriente es de 86 kA/m . Para mejorar la capacidad de la bobina, se encierra en una carcasa de acero, con el fin de mejorar el flujo magnético por el lado externo. El máximo campo magnético que se puede alcanzar con carcasa, es de 130 kA/m . En la Figura 3.5 a), se observa la capacidad de la bobina (H) como función de la intensidad de corriente (I), con y sin carcasa. El mayor valor de campo magnético que se puede generar es de 130 kA/m y es el valor utilizado en los ensayos.

La magnitud de la respuesta magnetoreológica depende del nivel de magnetización que alcance la goma. Para tener una estimación de este valor, se necesita una curva de magnetización. Esta curva muestra el nivel de magnetización interna (M) al aplicar un campo magnético externo (H).

La Figura 3.5 b) muestra la curva $M - H$ para un MRE representativo (Goma G227 y partículas Iron325 al 25 % en volumen). Para el máximo campo magnético posible (130 kA/m) el nivel de magnetización es mayor a 50 %. Este nivel de magnetización es apropiado para estudiar el comportamiento magnetoreológico; notar que mientras mayor es la magnetización lograda, más costoso es aumentarla.

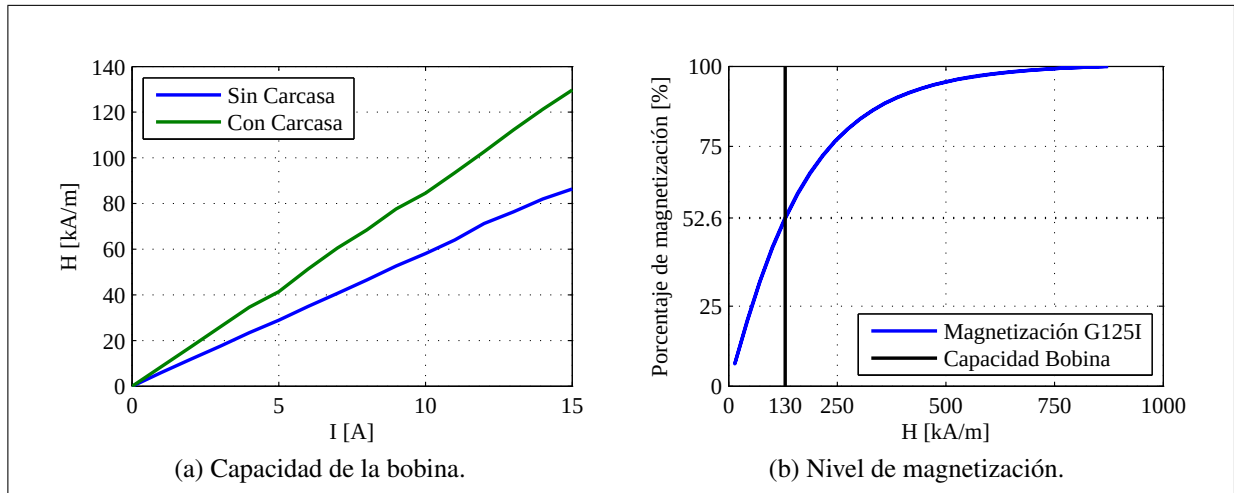


Figura 3.5: Propiedades magnéticas de la bobina y MRE

El circuito magnético utilizado, incluye una fuente de poder con capacidad de 30 V y 30 A, la bobina de inductancia $L = 0,0991H$ y la probeta de MRE. El circuito se muestra en la Figura 3.6. La fuente de poder en este caso posee un control de voltaje y corriente por lo que no es necesario incorporar medidores adicionales en el circuito.

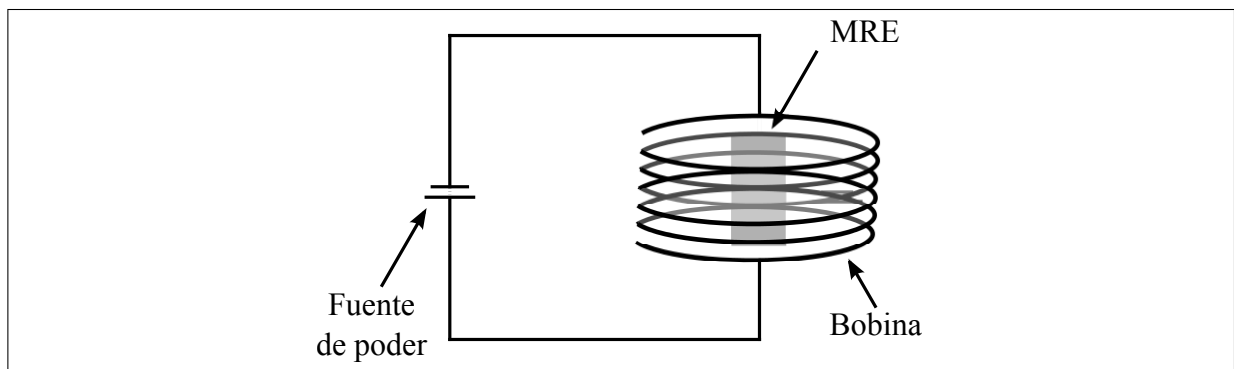


Figura 3.6: Circuito magnético.

3.2.2. Marco de carga y parámetros de ensayo

Para generar las sollicitaciones mecánicas y medir la fuerza y deformación de las probetas, se utiliza un marco de carga Instron modelo 8872. El marco tiene capacidad de carga de 2 *ton* axiales y una deformación máxima de 100 *mm*. En su base se encuentra una celda de carga Dynacell modelo 2527-140, con capacidad para 200 *ton*, mientras que en el brazo superior se ubican los transductores que miden la deformación impuesta por el pistón con precisión de 0,001*mm*. Para poder leer todos los datos medidos, la máquina se encuentra conectada a un computador PC mediante un controlador digital Fastrack 8800 y utiliza el software LabView

Los ensayos realizados son armónicos y de desplazamiento impuesto. Las variables a modificar en cada ensayo son: frecuencia (f), amplitud (A) de la excitación -controladas por el marco de cargas- y campo magnético (H) producido por la bobina. Cada una de las probetas de MRE se somete a un conjunto de combinaciones de estas tres variables.

De acuerdo a lo descrito en el capítulo 1.2.1, los parámetros E' , E'' y η dependen directamente de la frecuencia de excitación (f). Con el fin de recorrer los valores que el marco de carga puede generar, se utilizan 3 frecuencias: 0,1 Hz , 1,0 Hz y 2,0 Hz . El análisis presentado en el capítulo 1.2.1 es válido para sistemas lineales (deformaciones pequeñas). Si la deformación es demasiado grande, el comportamiento del sistema sale del rango lineal y los parámetros dejan de ser válidos. Los valores de amplitud utilizados son 1 %, 5 % y 10 % del largo inicial de la probeta. Dada la capacidad de la bobina, se consideran 4 casos, que son: 0 kA/m , 43 kA/m , 86 kA/m y 130 kA/m .

Capítulo 4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos realizados de acuerdo a lo descrito en los capítulos precedentes. En primer lugar se analizan los resultados pasivos, es decir aquellos en que no existe un campo magnético y luego los resultados en presencia de un campo magnético.

4.1. Pasivos

Los resultados pasivos corresponden a aquellos en que el campo magnético es nulo. Tienen por finalidad establecer el nivel base de las propiedades de los elastómeros, para poder compararlos entre sí y con los casos en que existe un campo magnético (resultados activos). En los ensayos el objetivo es comparar la influencia en las propiedades de los elastómeros de los diferentes tipos de partículas utilizadas y su concentración, además de la dependencia en amplitud y frecuencia. La comparación se realiza a base a tres parámetros del elastómero E' , E'' y η .

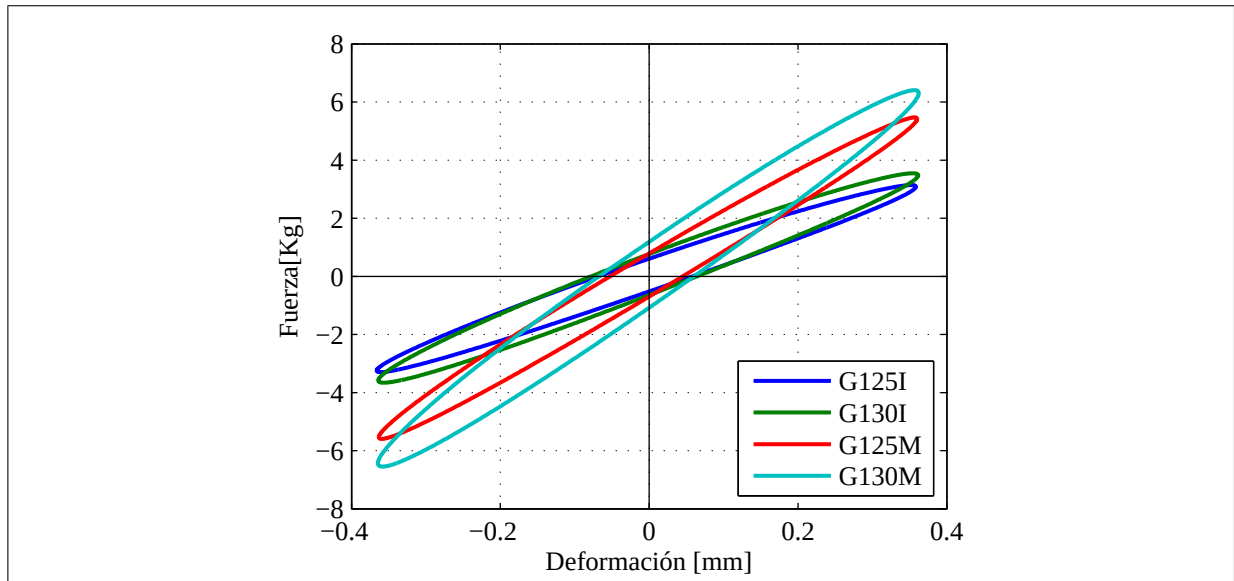


Figura 4.1: Resultados pasivos G1 a 0.1hz y 1 %.

Módulo de almacenamiento (E')

Es evidente de la Figura 4.1 que los casos con mayor concentración de partículas tienden a presentar una mayor rigidez. Los compuestos con magnetita son también más rígidos que los

reforzados con hierro. Este comportamiento es esperable, ya que la rigidez del hierro y de la magnetita son mayores que la de las matrices elastoméricas, por lo que mientras mayor sea el aporte de material adicional, mayor es el aumento de rigidez. Este fenómeno se puede observar directamente al comparar las rigideces equivalentes de las curvas para las cuatro combinaciones para una misma matriz elastomérica, sometidas a la misma deformación máxima (Figura 4.1). El aumento de la rigidez se observa como una rotación de la elipse en el sentido antihorario. Las curvas azul y roja (asociadas a las probetas con concentración de 25 %) tienen menor rigidez que las curvas verde y celeste, respectivamente (asociadas a 30 %).

Por otro lado, la mayor rigidez de los MRE con partículas de magnetita relativo al Iron325, puede parecer contraintuitiva, especialmente considerando que la magnetita tiene menor rigidez que el hierro, pero no lo es, ya que las partículas de magnetita, al tener menor tamaño, logran una mejor inserción al interior de las cadenas poliméricas y generan una mayor trabazón la que se traduce en una mayor rigidez.

La Tabla 4.1, muestra el valor de E' para los ensayos pasivos de todos los MRE construidos con goma tipo G1. Se observa cómo responde el elastómero a las distintas variables de diseño. En primer lugar, cada columna representa una concentración distinta de un mismo tipo de partículas. Comparando como varían los valores de una columna con la siguiente se aprecia la rigidización que se da al aumentar la frecuencia y la concentración de partículas. Por otra parte, los MRE con magnetita resultan más rígidos que los con Iron325. Con respecto a la frecuencia, se aprecia que E' crece con la frecuencia. Finalmente, la rigidez del material es inversamente proporcional a la amplitud del ciclo.

Por otra parte, la Tabla 4.2 muestra los resultados pasivos para los MRE en base al elastómero G2. Es evidente que los valores de rigidez resultante son mayores que los del compuesto G1. Las tendencias en el comportamiento de las variables se mantiene igual que en el caso anterior; es decir, la rigidez es directamente proporcional a la concentración de partículas y a la frecuencia de excitación y es inversamente proporcional a la amplitud del ciclo de deformación. Por las razones expuestas anteriormente, la magnetita rigidiza más el material que el polvo de hierro Iron325.

Para los MRE en base al compuesto G3, los resultados en condición pasiva se muestran en la Tabla 4.3. Los valores de E' resultan mayores para este compuesto en relación a ambos casos anteriores, pero las tendencias en el comportamiento con concentración, frecuencia y amplitud siguen siendo las mismas.

Tabla 4.1: Módulo de almacenamiento E' para elastómero G1.

A[%]	f[Hz]	G125I	G130I	G125M	G130M
1	0.1	8.69	9.65	15.09	17.45
	1	11.28	12.62	17.28	20.89
	2	12.17	13.75	18.04	22.02
5	0.1	8.05	8.91	12.01	13.30
	1	9.47	10.08	13.33	15.16
	2	10.13	10.80	13.74	15.81
10	0.1	6.64	7.91	10.43	11.13
	1	7.98	8.21	11.33	12.40
	2	8.40	8.76	11.57	12.81

Tabla 4.2: Módulo de almacenamiento E' para elastómero G2.

A[%]	f[Hz]	G225I	G230I	G225M	G230M
1	0.1	19.97	24.74	25.42	30.87
	1	22.50	27.84	29.21	36.35
	2	23.36	29.01	30.19	37.70
5	0.1	16.68	19.87	15.45	19.42
	1	17.87	21.46	16.52	21.01
	2	18.23	21.95	16.78	21.22
10	0.1	14.78	17.44	12.58	16.24
	1	15.54	17.96	13.10	16.79
	2	15.70	17.94	13.26	16.78

Tabla 4.3: Módulo de almacenamiento E' para elastómero G3.

A[%]	f[Hz]	G325I	G330I	G325M	G330M
1	0.1	35.47	46.40	49.06	55.92
	1	44.58	54.91	55.82	63.76
	2	47.82	56.92	58.21	64.86
5	0.1	21.04	25.50	30.51	34.72
	1	23.82	26.51	32.66	36.73
	2	24.98	27.54	33.15	37.17
10	0.1	15.12	17.69	24.62	27.98
	1	16.41	17.89	25.88	28.73
	2	16.78	18.13	26.08	28.84

Módulo de pérdida (E'')

El módulo de pérdida de los elastómeros con base G1, para los ensayos en condición pasiva se presentan en la Tabla 4.4. El valor de E'' crece proporcionalmente con la concentración de partículas y la frecuencia de la excitación en los casos descritos y decrece con la amplitud de deformación del ciclo de carga. En general los compuestos con magnetita tienen valores del módulo de pérdida E'' mayores que las los compuestos con Iron325.

Estos resultados se repiten para los compuestos con matriz elastomérica G2 y G3. Para los compuestos con matriz elastomérica G2, la Tabla ?? muestra los valores del módulo de pérdida E'' en condición pasiva. Al igual que en el caso anterior, la rigidez crece con la concentración de partículas y la frecuencia de excitación, y decrece con la amplitud. El relleno de magnetita produce un mayor amortiguamiento que el relleno de hierro Iron325. Sin embargo, las variaciones observadas en el elastómero G2 son menos marcadas que en el caso del elastómero G1.

Por otra parte, la Tabla 4.6 muestra los valores de E'' para el compuesto G3. Nuevamente el comportamiento muestra las mismas tendencias que en los casos anteriores, pero las variaciones en magnitud observadas son menores a las de los compuestos G1 y G2.

Tabla 4.4: Módulo de pérdida E'' para elastómero G1.

A[%]	f[Hz]	G125I	G130I	G125M	G130M
1	0.1	1.54	1.93	2.05	3.11
	1	2.30	2.90	2.53	3.96
	2	2.39	3.10	2.66	4.28
5	0.1	1.48	1.54	1.38	2.04
	1	1.97	2.36	1.81	2.70
	2	2.07	2.55	1.87	2.84
10	0.1	1.13	1.63	1.14	1.64
	1	1.72	2.09	1.50	2.21
	2	1.79	2.22	1.54	2.29

Tabla 4.5: Módulo de pérdida E'' para elastómero G2.

A[%]	f[Hz]	G225I	G230I	G225M	G230M
1	0.1	2.85	3.44	8.59	11.34
	1	3.47	4.13	9.96	14.06
	2	3.50	4.30	10.14	14.70
5	0.1	1.64	2.10	3.78	5.17
	1	2.16	2.68	4.38	6.26
	2	2.22	2.77	4.52	6.27
10	0.1	1.33	1.73	2.56	3.66
	1	1.75	2.20	3.00	4.26
	2	1.78	2.22	3.03	4.26

Tabla 4.6: Módulo de pérdida E'' para elastómero G3.

A[%]	f[Hz]	G325I	G330I	G325M	G330M
1	0.1	13.15	15.76	15.12	17.09
	1	16.07	17.83	17.30	18.31
	2	16.67	18.09	17.78	18.19
5	0.1	6.32	6.90	6.60	7.51
	1	7.85	7.73	7.52	8.36
	2	8.04	7.91	7.65	8.22
10	0.1	4.54	4.60	4.55	5.16
	1	5.66	5.39	5.23	5.80
	2	5.82	5.50	5.17	5.71

Factor de pérdida (η)

Como resultado derivado de los ensayos anteriores, el factor de pérdida $\eta = E''/E'$ para los tres compuestos se muestra en las Tablas 4.7 a 4.9. Los valores del factor de pérdida de los MRE en base a G1 se muestran en la Tabla 4.7. Estos valores son en términos absolutos bastante bajos en comparación con otros materiales viscoelásticos. Se aprecia que ellos crecen con la concentración y frecuencia y son relativamente constantes con amplitud. En este caso, la tendencia se invierte en relación a los casos anteriores y los elastómeros con Iron325 tienen un mayor valor de η que los compuestos con magnetita. Esto se explica por un mayor aumento del módulo de almacenamiento con respecto al de pérdida, pero tal como se ve a continuación esto no es siempre así.

Adicionalmente, la Tabla 4.8 resume los valores de η para los MRE basados en el elastómero G2. Se observa que el comportamiento del elastómero es similar al G1, manteniendo η relativamente constante para cada relleno. Sin embargo, en este caso los valores de η para el relleno de magnetita son mayores a los del relleno de hierro. En términos absolutos, los factores de pérdida con magnetita alcanzan valores interesantes como compuesto de alto amortiguamiento.

Para los elastómeros G3, los factores de pérdida en estado pasivo se muestran en la Tabla 4.9. Se observan las mismas tendencias de comportamiento que para las gomas con G2. Los valores de η son mayores para el relleno con hierro y se mantienen estables con frecuencia. Los valores de η en términos absolutos son muy interesantes alcanzando un máximo de 0,37.

Tabla 4.7: Factor de pérdida η para elastómero G1.

A[%]	f[Hz]	G125I	G130I	G125M	G130M
1	0.1	0.177	0.200	0.136	0.178
	1	0.204	0.230	0.146	0.190
	2	0.197	0.225	0.148	0.194
5	0.1	0.192	0.166	0.115	0.154
	1	0.208	0.234	0.136	0.178
	2	0.204	0.236	0.136	0.180
10	0.1	0.171	0.206	0.109	0.148
	1	0.216	0.255	0.132	0.178
	2	0.213	0.253	0.133	0.179

Tabla 4.8: Factor de pérdida η para elastómero G2.

A[%]	f[Hz]	G225I	G230I	G225M	G230M
1	0.1	0.143	0.139	0.338	0.367
	1	0.154	0.148	0.341	0.387
	2	0.150	0.148	0.336	0.390
5	0.1	0.098	0.106	0.244	0.266
	1	0.121	0.125	0.265	0.298
	2	0.122	0.126	0.269	0.296
10	0.1	0.090	0.099	0.204	0.226
	1	0.113	0.123	0.229	0.254
	2	0.114	0.124	0.228	0.254

Tabla 4.9: Factor de pérdida η para elastómero G3.

A[%]	f[Hz]	G325I	G330I	G325M	G330M
1	0.1	0.371	0.340	0.308	0.306
	1	0.360	0.325	0.310	0.287
	2	0.349	0.318	0.305	0.281
5	0.1	0.301	0.271	0.216	0.216
	1	0.329	0.292	0.230	0.228
	2	0.322	0.287	0.231	0.221
10	0.1	0.301	0.260	0.185	0.185
	1	0.345	0.301	0.202	0.202
	2	0.347	0.303	0.198	0.198

4.2. Condición bajo campo magnético

Los resultados en presencia de un campo magnético se refieren al caso con campo magnético nulo y de ahí observar las variaciones con respecto a los parámetros originales. Las variables previamente consideradas son tipo de matriz, concentración y tipo de partículas y frecuencia y amplitud del ciclo. En general, el comportamiento de los parámetros E' , E'' y η sigue las mismas tendencias ya mostradas en el caso pasivo. Sin embargo, para los resultados activos, se introduce el campo magnético como nueva variable, lo que genera un nuevo parámetro a estudiar. En la presencia de un campo magnético no nulo, la curva constitutiva fuerza-deformación

se desplaza hacia la zona de tracciones (Figura 4.2). De forma equivalente, este comportamiento se puede caracterizar como una fuerza adicional ΔF .

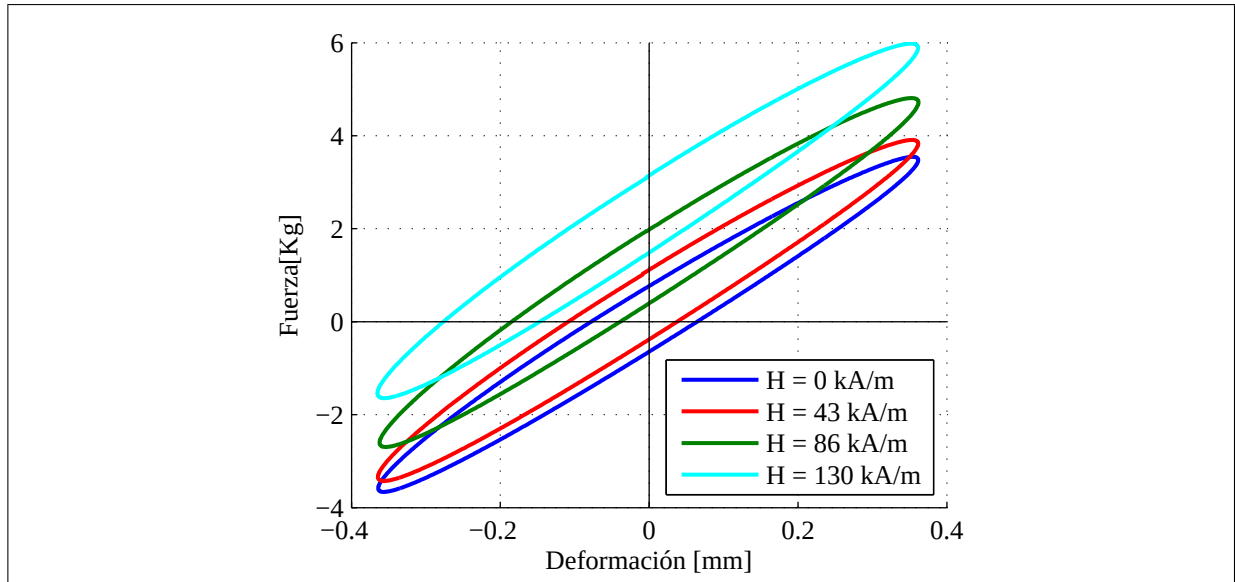


Figura 4.2: Resultados del elastómero G130I a 0.1 Hz, 1 % de deformación y campo magnético H

4.2.1. Módulo de almacenamiento(E')

Las Tablas 4.10, 4.11 y 4.12 muestran los resultados para todos los casos estudiados. Tal como en los casos pasivos, el módulo de almacenamiento aumenta con la concentración de partículas y con la frecuencia, mientras que tiende a disminuir con la amplitud. La rigidez del compuesto con magnetita es entre un 20 % y un 70 % superior al con hierro. Las variaciones de rigidez con el campo magnético son menores y bajo los campos magnéticos aplicados y condiciones experimentales utilizadas, la rigidez del elastómero es independiente de H .

4.2.2. Módulo de pérdida(E'')

Para matrices elastoméricas blandas, el módulo de pérdida tiende a crecer ligeramente con la intensidad del campo magnético. además E'' tiende a aumentar con la concentración de partículas y con la frecuencia, y decaer con la amplitud de deformación (Tablas 4.13, 4.14 y 4.15).

4.2.3. Factor de pérdida(η)

El valor del factor de pérdida η mantiene la misma respuesta que para los casos sin campo magnético frente a frecuencia, amplitud, tipo y concentración de partículas. Se observa que η no presenta una variación relevante con frecuencia ni intensidad del campo magnético H (Tablas 4.16, 4.17 y 4.18).

Tabla 4.10: Módulo de almacenamiento E' en matriz elastomérica G1 bajo campo magnético.

A[%]	f[Hz]	H[kA/m]	G125I	G130I	G125M	G130M
1	0.1	0	8.69	9.65	15.09	17.45
		43	8.81	9.83	15.15	17.43
		86	8.89	10.03	15.17	17.45
		130	8.96	10.15	15.18	17.56
	1	0	11.28	12.62	17.28	20.89
		43	11.37	12.84	17.38	20.86
		86	11.45	13.09	17.33	20.94
		130	11.51	13.20	17.31	20.85
	2	0	12.17	13.75	18.04	22.02
		43	12.22	13.90	18.06	22.00
		86	12.32	14.12	18.03	22.01
		130	12.40	14.22	18.00	21.96
	5	0	8.05	8.91	12.01	13.30
		43	8.02	8.82	11.91	13.09
		86	7.99	8.81	11.87	13.00
		130	7.94	8.79	11.83	12.94
5	0.1	0	9.47	10.08	13.33	15.16
		43	9.47	10.08	13.32	15.14
		86	9.51	10.14	13.29	15.13
		130	9.52	10.12	13.25	15.07
	1	0	10.13	10.80	13.74	15.81
		43	10.10	10.81	13.74	15.79
		86	10.12	10.89	13.74	15.75
		130	10.14	10.85	13.72	15.72
	2	0	6.64	7.91	10.43	11.13
		43	6.53	7.85	10.27	10.91
		86	6.48	7.85	10.20	10.83
		130	6.44	7.84	10.15	10.74
10	0.1	0	7.98	8.21	11.33	12.40
		43	7.95	8.17	11.31	12.35
		86	7.95	8.26	11.29	12.32
		130	7.95	8.19	11.26	12.27
	1	0	8.40	8.76	11.57	12.81
		43	8.38	8.72	11.55	12.78
		86	8.38	8.74	11.53	12.75
		130	8.38	8.71	11.52	12.73

Tabla 4.11: Módulo de almacenamiento E' en matriz elastomérica G2 bajo campo magnético.

A[%]	f[Hz]	H[kA/m]	G225I	G230I	G225M	G230M
1	0.1	0	19.97	24.74	25.42	30.87
		43	20.15	24.91	25.31	30.57
		86	20.38	25.09	25.18	30.57
		130	20.52	25.20	25.19	30.51
	1	0	22.50	27.84	29.21	36.35
		43	22.64	28.11	28.89	35.89
		86	22.77	28.31	28.68	35.50
		130	22.97	28.36	28.59	35.64
	2	0	23.36	29.01	30.19	37.70
		43	23.48	29.23	29.84	37.64
		86	23.57	29.30	29.70	37.42
		130	23.72	29.42	29.56	37.33
5	1	0	16.68	19.87	15.45	19.42
		43	16.47	19.67	15.17	18.91
		86	16.42	19.61	15.04	18.69
		130	16.38	19.58	14.97	18.59
	1	0	17.87	21.46	16.52	21.01
		43	17.83	21.49	16.44	20.90
		86	17.88	21.46	16.29	20.77
		130	17.85	21.48	16.41	20.72
	2	0	18.23	21.95	16.78	21.22
		43	18.23	21.94	16.76	21.18
		86	18.25	21.99	16.65	21.08
		130	18.27	21.98	16.66	21.06
10	2	0	14.78	17.44	12.58	16.24
		43	14.57	16.87	12.25	15.43
		86	14.48	16.67	12.14	15.20
		130	14.37	16.55	12.07	15.05
	1	0	15.54	17.96	13.10	16.79
		43	15.51	17.80	13.09	16.61
		86	15.52	17.78	13.02	16.43
		130	15.43	17.74	13.03	16.41
	2	0	15.70	17.94	13.26	16.78
		43	15.69	17.92	13.18	16.68
		86	15.70	17.89	13.17	16.55
		130	15.68	17.87	13.17	16.51

Tabla 4.12: Módulo de almacenamiento E' en matriz elastomérica G3 bajo campo magnético.

A[%]	f[Hz]	H[kA/m]	G325I	G330I	G325M	G330M
1	0.1	0	35.47	46.40	49.06	55.92
		43	35.03	45.12	49.12	55.38
		86	34.99	44.83	48.98	55.16
		130	35.04	44.43	48.88	55.00
	1	0	44.58	54.91	55.82	63.76
		43	44.58	54.24	55.16	63.33
		86	44.56	53.82	55.59	62.53
		130	44.64	54.08	55.59	62.35
	2	0	47.82	56.92	58.21	64.86
		43	47.62	56.93	57.77	64.68
		86	47.58	57.08	57.83	64.39
		130	47.79	56.71	57.94	63.93
5	0.1	0	21.04	25.50	30.51	34.72
		43	19.97	23.96	29.94	33.54
		86	19.58	23.37	29.73	33.17
		130	19.40	22.96	29.62	32.91
	1	0	23.82	26.51	32.66	36.73
		43	23.68	26.16	32.50	36.52
		86	23.46	26.08	32.49	36.14
		130	23.34	26.23	32.39	36.25
	2	0	24.98	27.54	33.15	37.17
		43	24.79	27.35	33.14	37.09
		86	24.67	27.24	33.14	36.88
		130	24.67	27.14	33.05	36.95
10	0.1	0	15.12	17.69	24.62	27.98
		43	14.20	15.94	24.08	26.72
		86	13.84	15.67	23.88	26.40
		130	13.60	15.45	23.72	26.09
	1	0	16.41	17.89	25.88	28.73
		43	16.12	17.81	25.78	28.61
		86	15.90	17.60	25.65	28.45
			15.94	17.61	25.60	28.31
	2	0	16.78	18.13	26.08	28.84
		43	16.63	18.05	25.97	28.60
		86	16.48	17.98	25.96	28.55
		130	16.52	17.98	25.94	28.47

Tabla 4.13: Módulo de pérdida E'' en matriz elastomérica G1 bajo campo magnético.

A[%]	f[Hz]	H[kA/m]	G125I	G130I	G125M	G130M
1	0.1	0	1.54	1.93	2.05	3.11
		43	1.60	2.03	2.04	3.12
		86	1.66	2.19	2.02	3.11
		130	1.70	2.25	2.02	3.11
	1	0	2.30	2.90	2.53	3.96
		43	2.33	2.99	2.54	3.97
		86	2.37	3.14	2.53	3.99
		130	2.40	3.28	2.53	4.04
	2	0	2.39	3.10	2.66	4.28
		43	2.45	3.23	2.71	4.22
		86	2.51	3.34	2.67	4.30
		130	2.60	3.43	2.68	4.22
	5	0	1.54	1.48	1.38	2.04
		43	1.58	1.49	1.37	2.01
		86	1.61	1.52	1.36	1.99
		130	1.63	1.54	1.36	1.98
5	1	0	1.97	2.36	1.81	2.70
		43	1.99	2.39	1.80	2.70
		86	2.01	2.46	1.80	2.71
		130	2.03	2.47	1.79	2.68
	2	0	2.07	2.55	1.87	2.84
		43	2.08	2.58	1.88	2.82
		86	2.11	2.63	1.88	2.82
		130	2.13	2.65	1.88	2.82
	10	0	1.13	1.63	1.14	1.64
		43	1.13	1.65	1.12	1.61
		86	1.14	1.69	1.12	1.60
		130	1.15	1.71	1.11	1.58
	1	0	1.72	2.09	1.50	2.21
		43	1.74	2.10	1.50	2.20
		86	1.74	2.14	1.51	2.21
		130	1.77	2.16	1.51	2.19
	2	0	1.79	2.22	1.54	2.29
		43	1.81	2.25	1.53	2.28
		86	1.83	2.28	1.54	2.28
		130	1.85	2.30	1.53	2.26

Tabla 4.14: Módulo de pérdida E'' en matriz elastomérica G2 bajo campo magnético.

A[%]	f[Hz]	H[kA/m]	G225I	G230I	G225M	G230M
1	0.1	0	2.85	3.44	8.59	11.34
		43	2.91	3.46	8.27	11.32
		86	2.92	3.51	8.22	11.28
		130	2.98	3.56	8.16	11.24
	1	0	3.47	4.13	9.96	14.06
		43	3.52	4.25	9.81	14.02
		86	3.59	4.33	9.84	13.92
		130	3.64	4.36	9.82	13.85
	2	0	3.50	4.30	10.14	14.70
		43	3.60	4.43	10.22	14.75
		86	3.60	4.53	10.25	14.63
		130	3.68	4.61	10.27	14.88
5	0.1	0	1.64	2.10	3.78	5.17
		43	1.63	2.05	3.65	4.98
		86	1.65	2.06	3.60	4.89
		130	1.65	2.08	3.57	4.86
	1	0	2.16	2.68	4.38	6.26
		43	2.16	2.71	4.32	6.12
		86	2.18	2.72	4.33	5.97
		130	2.18	2.76	4.33	6.01
	2	0	2.22	2.77	4.52	6.27
		43	2.22	2.77	4.45	6.23
		86	2.23	2.82	4.48	6.06
		130	2.26	2.83	4.34	6.06
10	0.1	0	1.33	1.73	2.56	3.66
		43	1.32	1.67	2.48	3.45
		86	1.32	1.66	2.45	3.38
		130	1.27	1.66	2.42	3.33
	1	0	1.75	2.20	3.00	4.26
		43	1.77	2.21	2.96	4.22
		86	1.78	2.23	2.94	4.16
		130	1.75	2.22	2.95	4.12
	2	0	1.78	2.22	3.03	4.26
		43	1.78	2.22	3.00	4.18
		86	1.81	2.20	2.95	4.15
		130	1.82	2.24	2.95	4.11

Tabla 4.15: Módulo de pérdida E'' en matriz elastomérica G3 bajo campo magnético.

A[%]	f[Hz]	H[kA/m]	G325I	G330I	G325M	G330M
1	0.1	0	13.15	15.76	15.12	17.09
		43	13.09	15.32	15.10	16.28
		86	13.17	15.24	15.10	15.99
		130	13.25	15.19	15.04	15.80
	1	0	16.07	17.83	17.30	18.31
		43	16.22	17.72	17.41	18.37
		86	16.37	17.87	17.46	18.26
		130	16.52	17.97	17.40	18.13
	2	0	16.67	18.09	17.78	18.19
		43	16.82	18.15	17.90	18.29
		86	17.04	18.29	18.29	18.39
		130	16.92	18.54	17.85	18.51
5	0.1	0	6.32	6.90	6.60	7.51
		43	6.13	6.40	6.43	7.06
		86	6.05	6.30	6.35	6.96
		130	6.06	6.32	6.29	6.88
	1	0	7.85	7.73	7.52	8.36
		43	7.85	7.66	7.58	8.32
		86	7.80	7.65	7.48	8.21
		130	7.80	7.69	7.42	8.20
	2	0	8.04	7.91	7.65	8.22
		43	8.11	7.95	7.49	8.25
		86	8.09	7.84	7.53	8.26
		130	8.21	7.89	7.51	8.03
10	0.1	0	4.54	4.60	4.55	5.16
		43	4.40	4.30	4.42	4.89
		86	4.32	4.28	4.37	4.83
		130	4.30	4.25	4.32	4.75
	1	0	5.66	5.39	5.23	5.80
		43	5.62	5.42	5.20	5.78
		86	5.55	5.41	5.18	5.78
		130	5.69	5.42	5.11	5.69
	2	0	5.82	5.50	5.17	5.71
		43	5.76	5.43	5.19	5.70
		86	5.74	5.48	5.10	5.67
		130	5.78	5.46	5.07	5.65

Tabla 4.16: Factor de pérdida η en matriz elastomérica G1 bajo campo magnético.

A[%]	f[Hz]	H[kA/m]	G125I	G130I	G125M	G130M
1	0.1	0	0.177	0.200	0.136	0.178
		43	0.182	0.207	0.135	0.179
		86	0.187	0.218	0.134	0.178
		130	0.190	0.222	0.133	0.177
	1	0	0.204	0.230	0.146	0.190
		43	0.205	0.233	0.146	0.190
		86	0.207	0.240	0.146	0.191
		130	0.209	0.248	0.146	0.194
	2	0	0.197	0.225	0.148	0.194
		43	0.201	0.233	0.150	0.192
		86	0.204	0.237	0.148	0.196
		130	0.210	0.241	0.149	0.192
	5	0	0.192	0.166	0.115	0.154
		43	0.197	0.169	0.115	0.153
		86	0.201	0.172	0.115	0.153
		130	0.206	0.175	0.115	0.153
5	0.1	0	0.208	0.234	0.136	0.178
		43	0.210	0.237	0.135	0.179
		86	0.211	0.243	0.136	0.179
		130	0.213	0.244	0.135	0.178
	1	0	0.204	0.236	0.136	0.180
		43	0.206	0.238	0.137	0.179
		86	0.208	0.242	0.137	0.179
		130	0.210	0.244	0.137	0.180
	2	0	0.171	0.206	0.109	0.148
		43	0.173	0.211	0.109	0.148
		86	0.176	0.215	0.109	0.148
		130	0.178	0.219	0.109	0.147
	10	0	0.216	0.255	0.132	0.178
		43	0.219	0.257	0.133	0.178
		86	0.219	0.260	0.134	0.179
		130	0.223	0.264	0.134	0.178
10	1	0	0.213	0.253	0.133	0.179
		43	0.215	0.258	0.133	0.178
		86	0.218	0.261	0.134	0.179
		130	0.221	0.264	0.133	0.178

Tabla 4.17: Factor de pérdida η en matriz elastomérica G2 bajo campo magnético.

A[%]	f[Hz]	H[kA/m]	G225I	G230I	G225M	G230M
1	0.1	0	0.143	0.139	0.338	0.367
		43	0.144	0.139	0.327	0.370
		86	0.143	0.140	0.327	0.369
		130	0.145	0.141	0.324	0.368
	1	0	0.154	0.148	0.341	0.387
		43	0.155	0.151	0.340	0.391
		86	0.158	0.153	0.343	0.392
		130	0.158	0.154	0.343	0.388
	2	0	0.150	0.148	0.336	0.390
		43	0.153	0.152	0.343	0.392
		86	0.153	0.155	0.345	0.391
		130	0.155	0.157	0.348	0.399
5	0.1	0	0.098	0.106	0.244	0.266
		43	0.099	0.104	0.241	0.264
		86	0.100	0.105	0.239	0.262
		130	0.101	0.106	0.238	0.262
	1	0	0.121	0.125	0.265	0.298
		43	0.121	0.126	0.263	0.293
		86	0.122	0.127	0.266	0.287
		130	0.122	0.128	0.264	0.290
	2	0	0.122	0.126	0.269	0.296
		43	0.122	0.127	0.265	0.294
		86	0.122	0.128	0.269	0.287
		130	0.124	0.129	0.261	0.288
10	0.1	0	0.090	0.099	0.204	0.226
		43	0.090	0.099	0.202	0.224
		86	0.091	0.100	0.201	0.222
		130	0.089	0.100	0.201	0.221
	1	0	0.113	0.123	0.229	0.254
		43	0.114	0.124	0.226	0.254
		86	0.115	0.125	0.226	0.253
		130	0.113	0.125	0.227	0.251
	2	0	0.114	0.124	0.228	0.254
		43	0.113	0.124	0.228	0.250
		86	0.115	0.123	0.224	0.251
		130	0.116	0.125	0.224	0.249

Tabla 4.18: Factor de pérdida η en matriz elastomérica G3 bajo campo magnético.

A[%]	f[Hz]	H[kA/m]	G325I	G330I	G325M	G330M
1	0.1	0	0.371	0.340	0.308	0.306
		43	0.374	0.340	0.308	0.294
		86	0.377	0.340	0.308	0.290
		130	0.378	0.342	0.308	0.287
	1	0	0.360	0.325	0.310	0.287
		43	0.364	0.327	0.316	0.290
		86	0.367	0.332	0.314	0.292
		130	0.370	0.332	0.313	0.291
	2	0	0.349	0.318	0.305	0.281
		43	0.353	0.319	0.310	0.283
		86	0.358	0.321	0.316	0.286
		130	0.354	0.327	0.308	0.290
5	0.1	0	0.301	0.271	0.216	0.216
		43	0.307	0.267	0.215	0.211
		86	0.309	0.270	0.214	0.210
		130	0.313	0.275	0.212	0.209
	1	0	0.329	0.292	0.230	0.228
		43	0.332	0.293	0.233	0.228
		86	0.332	0.293	0.230	0.227
		130	0.334	0.293	0.229	0.226
	2	0	0.322	0.287	0.231	0.221
		43	0.327	0.291	0.226	0.222
		86	0.328	0.288	0.227	0.224
		130	0.333	0.291	0.227	0.217
10	0.1	0	0.301	0.260	0.185	0.185
		43	0.310	0.270	0.184	0.183
		86	0.312	0.273	0.183	0.183
		130	0.316	0.275	0.182	0.182
	1	0	0.345	0.301	0.202	0.202
		43	0.349	0.304	0.202	0.202
		86	0.349	0.308	0.202	0.203
		130	0.357	0.308	0.200	0.201
	2	0	0.347	0.303	0.198	0.198
		43	0.346	0.301	0.200	0.199
		86	0.348	0.305	0.196	0.199
		130	0.350	0.304	0.195	0.199

4.2.4. Pretensión (ΔF)

La tendencia de la respuesta para E' y E'' a mantenerse relativamente constante en presencia de un campo magnético de intensidad variable no es consistente con lo que se observa en la literatura; sin embargo, la ausencia de este efecto en el comportamiento no suprime la existencia de un efecto magnetoreológico en los ensayos realizados. En presencia de un campo magnético, la curva fuerza deformación de los MRE sufre un desplazamiento hacia la zona de tracciones, es decir, una pretensión. Este comportamiento se debe a la interacción de las partículas de hierro entre sí y con las tapas de acero, lo que genera una pre-compresión interna.

Considerando la estabilidad mostrada por los parámetros E' , E'' y η al variar el campo magnético, se puede añadir un término a la Ecuación 1.1:

$$f(t) = S(\omega)u(t) + L(\omega)u_0\sqrt{1 - \left(\frac{u(t)}{u_0}\right)^2} + \Delta F(H)$$

donde ΔF corresponde al efecto magnetoreológico y es función de la intensidad del campo magnético H , el que a su vez es función de la intensidad de corriente I que circula por la bobina (Figura 3.5 a). Por otro lado, el efecto magnetoreológico observado es independiente de la frecuencia y la amplitud de la excitación, es decir, es dependiente sólo de las propiedades del elastómero (matriz elastomérica, tipo y concentración de partículas).

La respuesta magnetoreológica de un MRE queda entonces caracterizada con la curva ΔF versus H . La Figura 4.3 muestra esta curva para los MRE con matriz elastomérica G1. En ella se observa que las curvas de los MRE con Iron325 se ubican por sobre las curvas de los MRE con magnetita, lo que muestra un mayor efecto magnetoreológico para este tipo de partículas. Respecto de la concentración, Iron325 no muestra diferencia alguna, pero para los MRE con magnetita, la curva de mayor concentración muestra un efecto magnetoreológico más pronunciado en 2 de los 3 puntos.

La curva ΔF versus H para los elastómeros con matriz G2, se presenta en la Figura 4.4. En este caso nuevamente se observa que las curvas asociadas a los MRE que contienen Iron325 tienen efecto magnetoreológico más pronunciado. Por otra parte, para las curvas asociadas a

Iron325, 2 de los 3 puntos muestran que a mayor concentración mayor ΔF , al igual que la curva completa de los MRE con magnetita.

La respuesta magnetoreológica de los MRE con matriz G3 se puede apreciar en la Figura 4.5. En ella nuevamente se observa que los elastómeros con partículas Iron325 tienen un efecto MR más pronunciado. En cuanto a la concentración, se observa que para ambos tipos de partículas se aprecia que 2 de los 3 puntos tienen mayor ΔF cuando la concentración es mayor.

Comparando el efecto magnetoreológico en todos los MRE fabricados, se observa que los que tienen partículas Iron325 presentan mayor efecto magnetoreológico. También a mayor concentración, mayor ΔF . Si bien este efecto no se presenta en todos de los puntos, se puede atribuir al ruido propio del sistema de medición que genera pequeños errores.

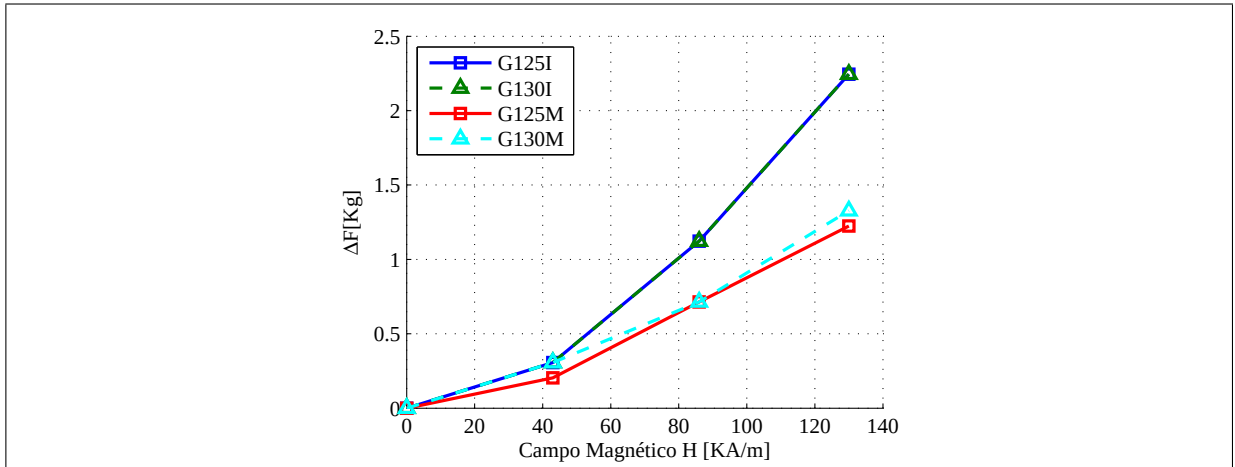


Figura 4.3: Variación del incremento de pretensión ΔF en el elastómero G1.

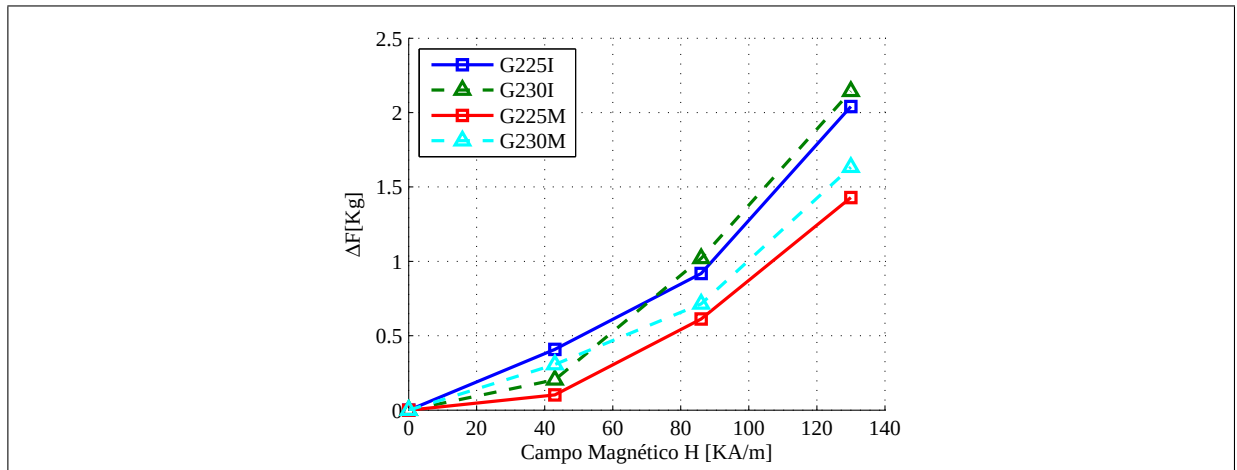


Figura 4.4: Variación del incremento de pretensión ΔF en el elastómero G2.

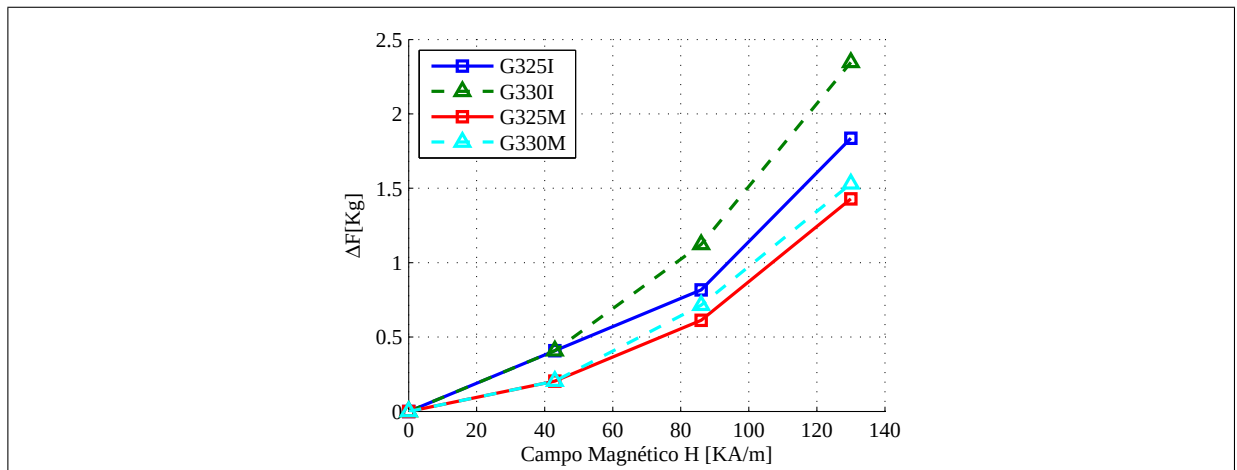


Figura 4.5: Variación del incremento de pretensión ΔF en el elastómero G3.

Capítulo 5. RELACIÓN CONSTITUTIVA FUERZA-DEFORMACIÓN VARIABLE

Bajo la presencia de un campo magnético, los MRE estudiados no demuestran un cambio considerable y consistente de los módulos de almacenamiento y pérdida. A pesar esto, utilizando el desplazamiento hacia la zona de tracciones observado, se puede conseguir modificar la constitutiva del material en tiempo real para lograr un control sobre la rigidez y el amortiguamiento.

Cada Punto $F(\varepsilon)$ se puede desplazar verticalmente entre su posición en la curva para campo magnético nulo y máximo. Dicho de otra manera, se genera una zona factible para la rama superior y otra para la rama inferior de la curva, que se puede observar en la Figura 5.1.

Es recomendable que el sistema quede centrado cuando $\Delta F = \Delta F(H_{max})/2$. Esto se puede lograr con una pretensión o un campo magnético inicial. Al tener el sistema centrado de esta manera, ya no sólo se puede mover la curva hacia la zona de tracciones, sino que también se puede desplazar hacia la zona de compresiones, dándole mayor versatilidad al material.

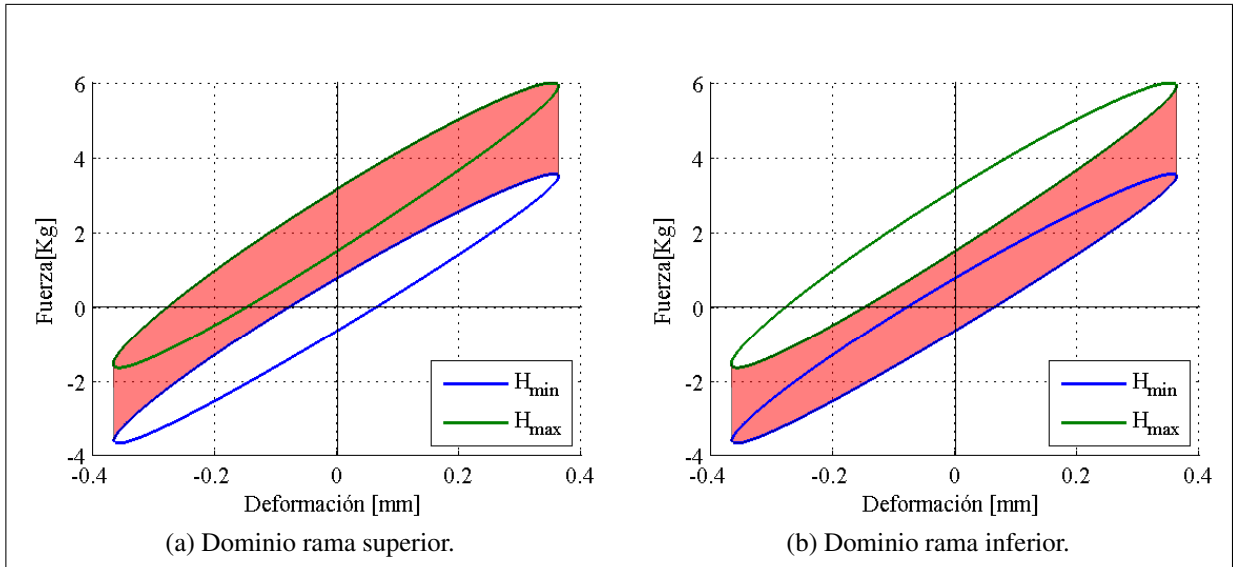


Figura 5.1: Posibles constitutivas fuerza-deformación del compuesto G130I.

Como ya se ha establecido, ΔF es un parámetro propio del material y no depende de la excitación. En consideración a lo anterior, el efecto magnetoreológico es relativo a la fuerza (y

deformación) máxima en el material. Es por esto, que para frecuencias y amplitudes bajas, ΔF tiene mayor importancia.

Para los ejemplos a continuación se utiliza como elastómero base G130I, ya que tiene una matriz más blanda y mayor concentración de partículas. La excitación considerada es con frecuencia de $0,1\text{Hz}$ y amplitud de 1% .

5.1. Máximo amortiguamiento

Para lograr el máximo amortiguamiento interno, se debe aumentar el área de la curva al máximo. Para lograr esto, la rama superior, debe ir junto a la curva de máximo campo magnético y la rama inferior corresponde a la rama inferior de la curva sin campo magnético (Figura 5.2). A nivel de control, este sistema es relativamente simple. Si la velocidad de deformación es positiva, el campo magnético es el máximo. Si la velocidad de deformación es negativa, el campo magnético es nulo.

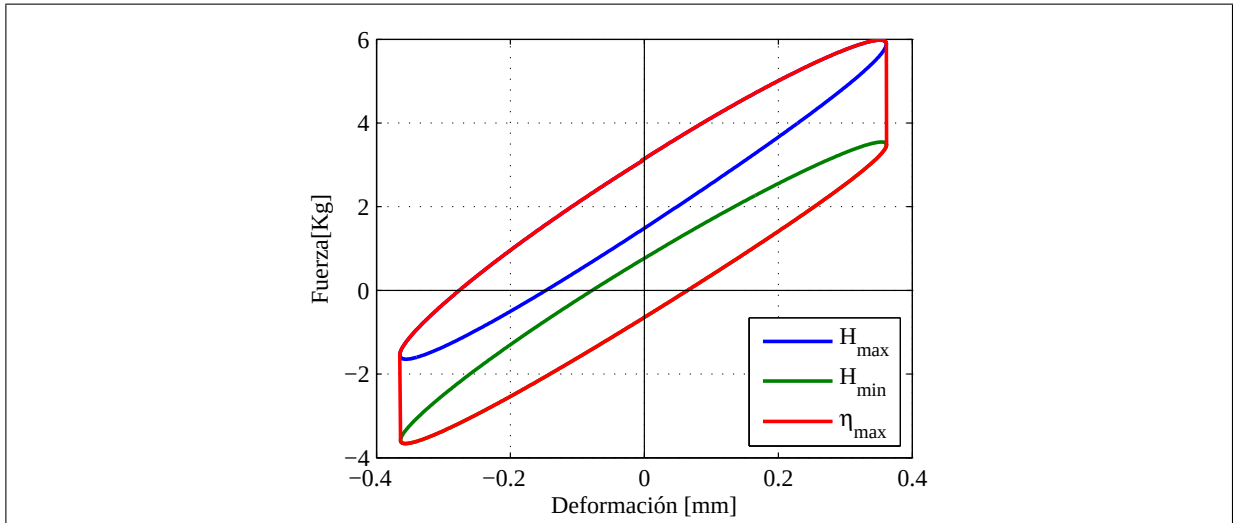


Figura 5.2: Curva con máxima energía disipada para G130I a 0.1 Hz y deformación de 1% .

La Tabla 5.1, muestra los parámetros E' , E'' y η para 3 casos, máximo campo magnético, mínimo campo magnético y máximo amortiguamiento. Se observa que la rigidez del elastómero se mantiene en el mismo rango en todos los casos, mientras que el módulo de pérdida aumenta considerablemente a medida que H crece. Sumando ambos efectos, se observa que el factor de pérdida aumenta por un factor cercano a 3.

Tabla 5.1: Propiedades del elastómero para máximo amortiguamiento.

	E'	E''	η
$H_{\max}$	10.15	2.25	0.222
$H_{\min}$	9.65	1.93	0.200
$C_{\max}$	9.91	5.95	0.601

5.2. Máxima rigidez

La Figura 5.3 muestra 3 curvas, correspondientes a los campos magnéticos máximo y mínimo y a la curva con máxima rigidez. Gráficamente se puede apreciar un aumento importante de la rigidez en la curva roja. La variación de rigidez no es tan directa como la de amortiguamiento, pero de igual manera se puede realizar con un control relativamente sencillo. De la Figura 5.3 se observa que el valor de ΔF requerido cuando la deformación es mínima, es $\Delta F_{\min}$. Cuando la deformación es máxima, se requiere que ΔF sea máximo y en el punto medio, se requiere que ΔF sea el promedio de ambos valores. A partir de lo anterior, la relación $\Delta F(u)$ es lineal.

Luego, dado un valor de deformación u , se tiene que $\Delta F = \frac{u}{u_{\max}} \Delta F_{\max}$. Con el valor de ΔF requerido y utilizando la curva ΔF vs H , se obtiene la magnitud del campo magnético necesario. Finalmente, para conocer el valor de la corriente que se necesita, se utilizan los valores de la relación H versus I (Figura 3.5 a).

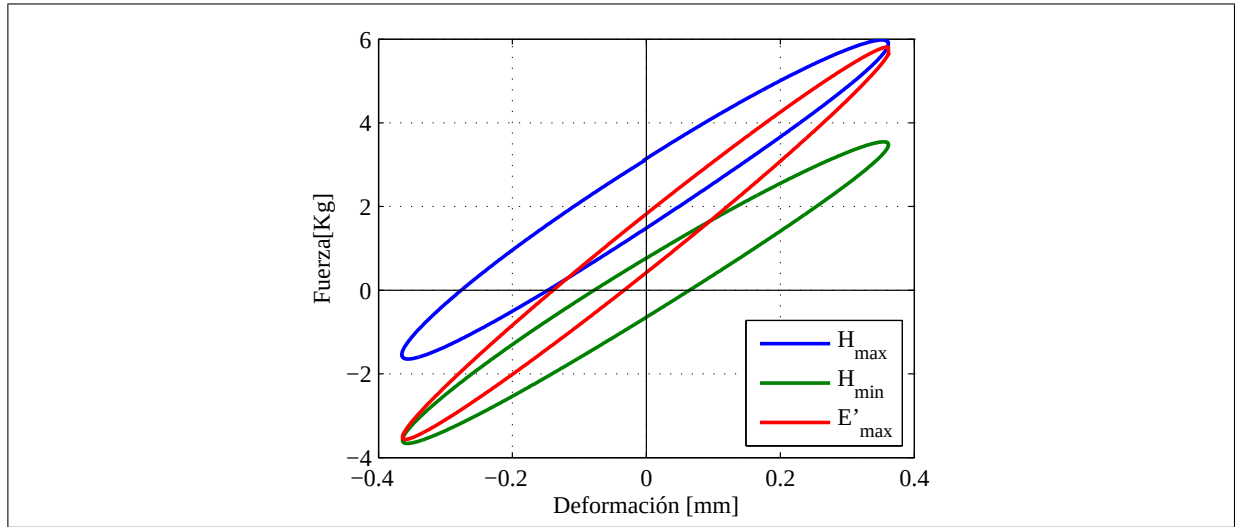


Figura 5.3: Curva con máxima rigidez posible para G130I, frecuencia 0.1 Hz y deformación máxima 1 %.

Tabla 5.2: Propiedades del elastómero para máxima rigidez.

	E'	E''	η
$H_{\max}$	10.15	2.25	0.222
$H_{\min}$	9.65	1.93	0.200
$K_{\max}$	12.73	1.93	0.151

Numéricamente, el aumento de rigidez resulta de un 25 % (Tabla 5.2), mientras que la variación de E'' es despreciable. La mayor rigidez hace que η disminuya en un 47 %.

Capítulo 6. INVESTIGACIÓN FUTURA

La continuación de este estudio de los MRE con constitutiva fuerza-deformación variable debería orientarse a mejorar el valor de ΔF que se puede lograr. Esto se puede enfrentar desde el campo magnético o desde la probeta. Para mejorar el campo magnético, se puede optimizar el diseño de la bobina enfocado en casos de amplitud pequeña, reduciendo el diámetro interior y acercando las espiras a la probeta. Este cambio es relativamente sencillo y poco costoso, pero no demasiado efectivo. Para lograr un aumento considerable del campo magnético, lo más efectivo sería trabajar con superconductores, con lo que se lograría un aumento de alrededor de un orden de magnitud.

El efecto magnetoreológico se ve influenciado por diversos parámetros de las probetas, como el tipo de partículas, su concentración y el tipo de matriz elastomérica utilizada. De acuerdo a los resultados obtenidos, las partículas de Iron325 entregan un mayor ΔF , esto puede ser por la composición o por el tamaño de las partículas. Dadas las muestras utilizadas en este ensayo, no queda claro cual es el factor que controla, por lo que utilizar una mayor muestra de partículas puede entregar MRE con efectos más pronunciados.

Si se aumenta la concentración, mayor es el efecto magnetoreológico, pero más allá de un 30 % en volumen, se vuelve difícil construir las probetas y vulcanizar el material. Se pueden investigar formas de lograr MRE con mayor concentración de partículas. Una alternativa para incorporar mayor volumen de material ferroso al interior de las probetas es intercalar láminas perpendiculares a la dirección del campo magnético, con el fin de uniformarlo y generar mayores fuerzas de interacción entre las partículas, láminas y tapas.

El último parámetro que se puede modificar en las probetas es la matriz elastomérica. Si bien no se observa una tendencia clara de alguna de las gomas a mejorar a partir del valor de ΔF , sí se aprecia que mientras más blanda es la matriz, mayor es el efecto relativo, con lo que se pueden lograr variaciones más pronunciadas de K o C .

Capítulo 7. CONCLUSIONES

Se concluye de este estudio que el concepto presentado en la literatura, donde el campo magnético produce un cambio directo en la rigidez y amortiguamiento de los MRE no se observa en los ensayos realizados. Sin embargo existe un comportamiento igualmente interesante: la curva constitutiva se desplaza hacia la zona de tracciones como resultado de H . Este nuevo comportamiento entrega una gran versatilidad en el uso de los MRE. La constitutiva ya no es una curva fija, dada por las propiedades del material y de la excitación, sino que se puede controlar mediante la variación de la intensidad del campo magnético utilizado, dependiendo de las necesidades existentes. Con un sistema de control apropiado, se puede modificar la rigidez y el amortiguamiento de un MRE en presencia de un campo magnético.

El valor de ΔF tiene un comportamiento exponencial como función de la intensidad del campo magnético aplicado H y es independiente de las características de la excitación como frecuencia o amplitud. Las probetas con Iron325 tienen un mayor desplazamiento hacia la zona de tracciones que las con magnetita y la concentración de las partículas tiene una relación proporcional con ΔF .

Los MRE con constitutiva variable son ideales para sistemas de reducción de vibraciones donde se necesita un ajuste en tiempo real por variaciones en el sistema a proteger o en la excitación. Sin embargo, las magnitudes de los valores obtenidos en los ensayos realizados no permiten pensar en aplicaciones a gran escala por el momento.

Para dar mayor aplicabilidad a los elastómeros magnetoreológicos, se pueden realizar mejoras a la disposición de los elementos involucrados, como láminas de acero al interior del MRE y/o buscar alternativas que aumenten el campo magnético disponible como optimizar la bobina o trabajar con superconductores.

El valor promedio de η para los elastómeros G1, G2 y G3 es de 0,185, 0,206 y 0,280, respectivamente. Valores por sobre 0,3 aparecen como interesantes en el diseño de disipadores de energía.

Bibliografía

- Ashour, O., Rogers, C. A., y Kordonsky, W. (1996). Magnetorheological fluids: Materials, characterization, and devices. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 7(2), 123-130.
- Böse, H. (2007). Viscoelastic properties of silicon-based magnetorheological elastomers. *Proceedings of the 10th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (F Gordaninejad, O. Graeva, A. Fuchs and D. York, Eds.)*, 51-57.
- Böse, H., y Röder, R. (2009). Magnetorheological elastomers with high variability of their mechanical properties. *Journal of Physics: Conference Series*, 149(1), 012090.
- Davis, L. C. (1999). Model of magnetorheological elastomers. *Journal of Applied Physics*, 85(6), 3348-3351.
- Ivaneyko, D., Toshchevikov, V. P., Saphiannikova, M., y Heinrich, G. (2011). Magneto-sensitive elastomers in a homogeneous magnetic field: A regular rectangular lattice model. *Macromolecular Theory and Simulations*, 20(6), 411-424.
- Jolly, M. R., Carlson, J. D., y Muñoz, B. C. (1996). A model of the behaviour of magnetorheological materials. *Smart Materials and Structures*, 5(5), 607-614.
- Kallio, M., Lindroos, T., Aalto, S., Järvinen, E., Kärnä, T., y Meinander, T. (2007). Dynamic compression testing of a tunable spring element consisting of a magnetorheological elastomer. *Smart Materials and Structures*, 16(2), 506-514.
- Lokander, M., y Stenberg, B. (2003a). Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials. *Polymer Testing*, 22(6), 677-680.
- Lokander, M., y Stenberg, B. (2003b). Performance of isotropic magnetorheological rubber materials. *Polymer Testing*, 22(3), 245-251.
- Soong T.T., G. D. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. John Wiley and Sons.
- Wayman, C. (1993). Shape memory alloys. *MRS Bulletin*, 18(4), 49-56.

ANEXOS

ANEXO A. CURVAS DE RESPUESTA PASIVA

A.1. G1

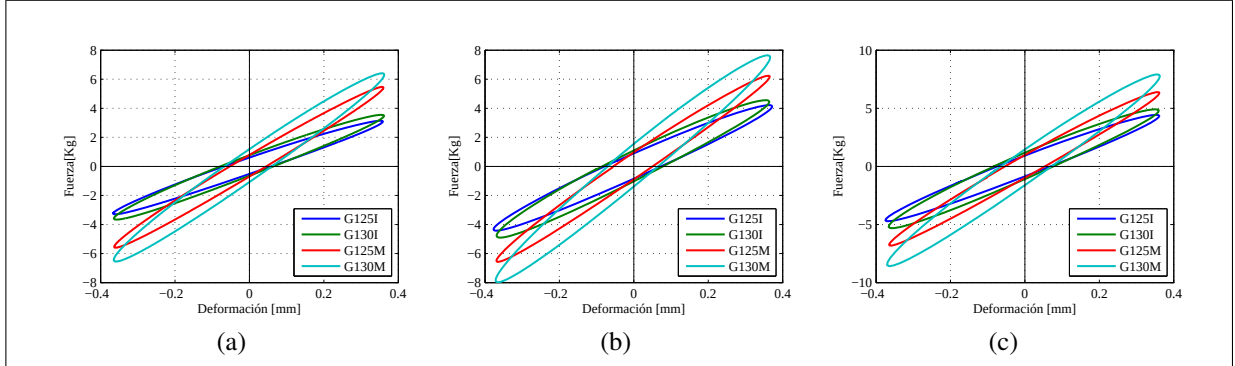


Figura A.1: Resultados pasivos G1 a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

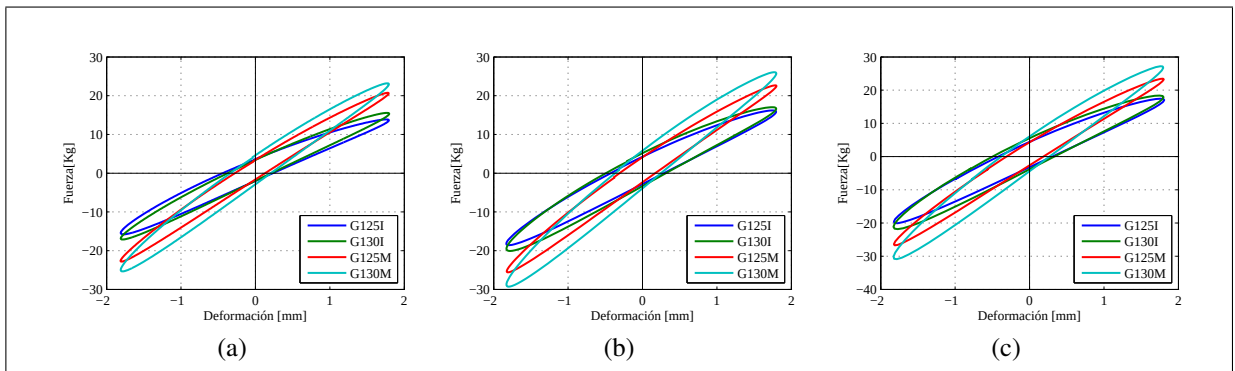


Figura A.2: Resultados pasivos G1 a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

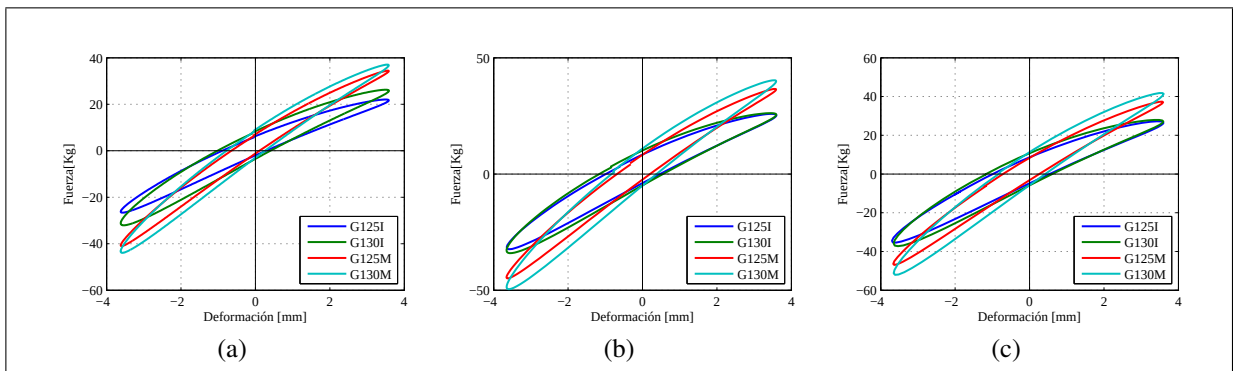


Figura A.3: Resultados pasivos G1 a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

A.2. G2

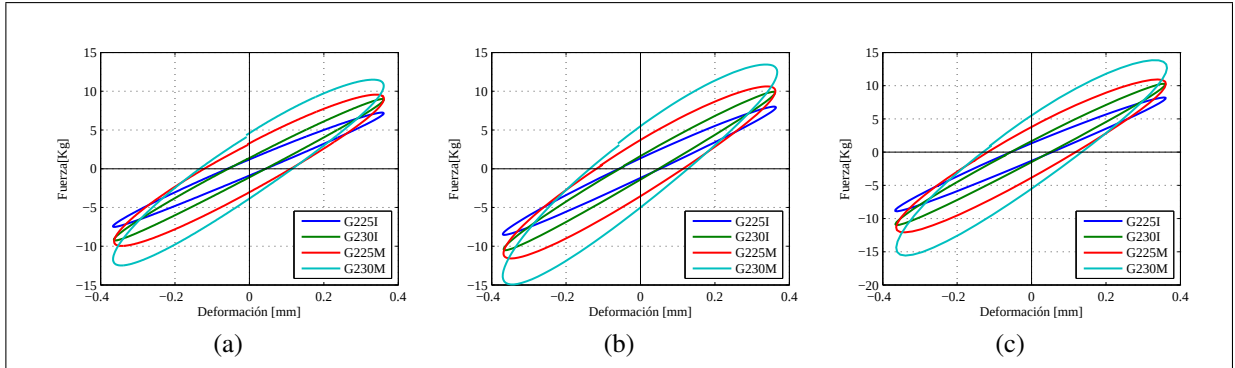


Figura A.4: Resultados pasivos G2 a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

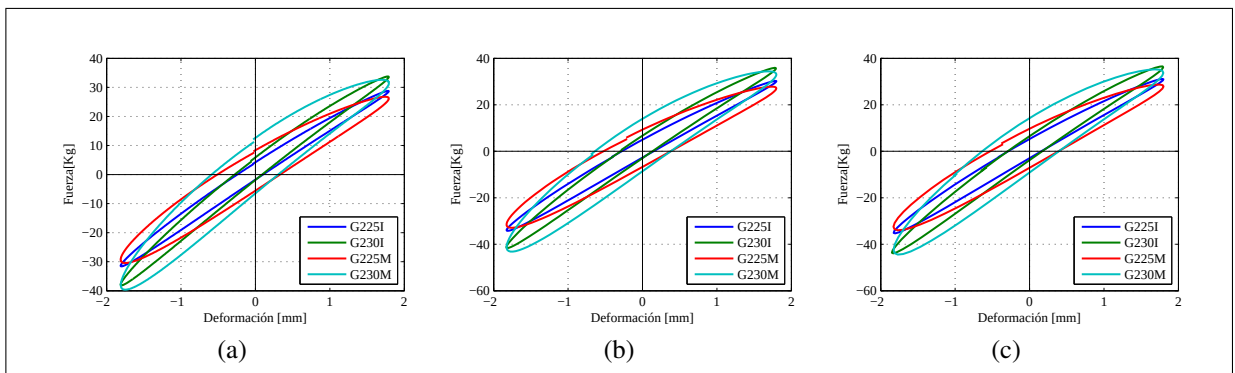


Figura A.5: Resultados pasivos G2 a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

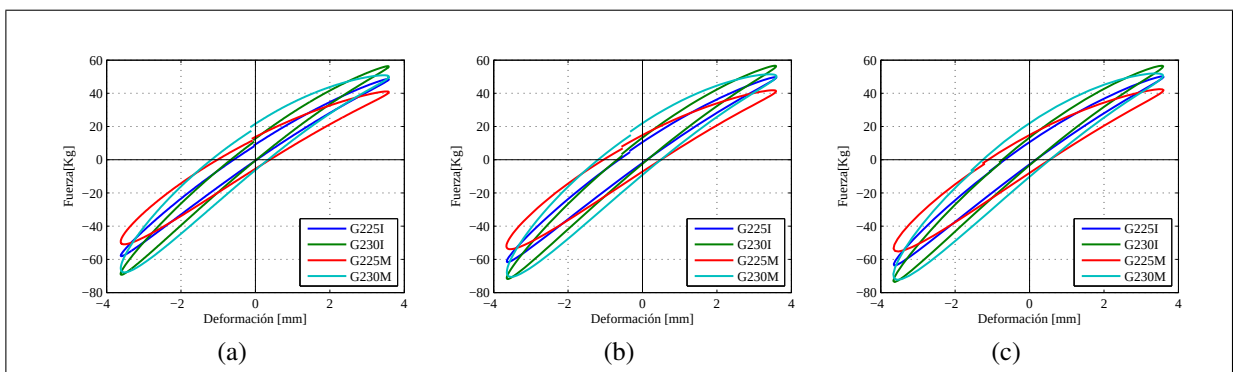


Figura A.6: Resultados pasivos G2 a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

A.3. G3

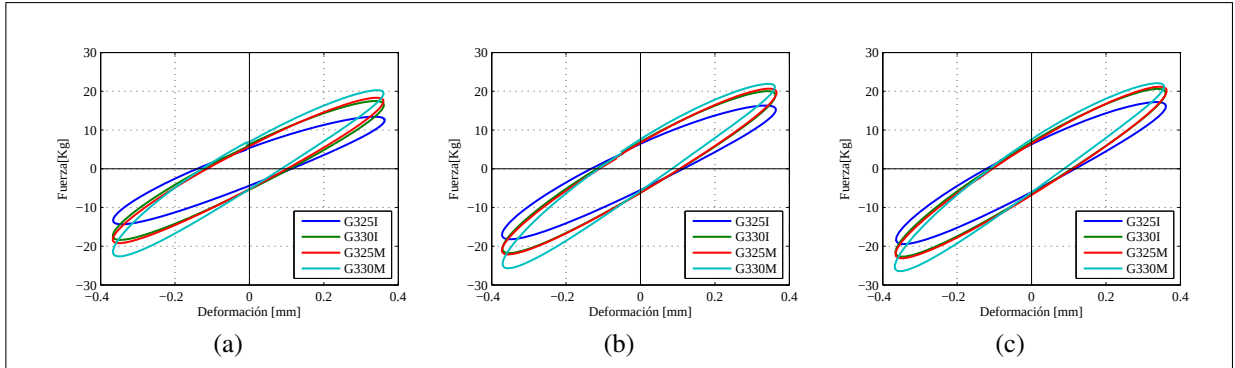


Figura A.7: Resultados pasivos G3 a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

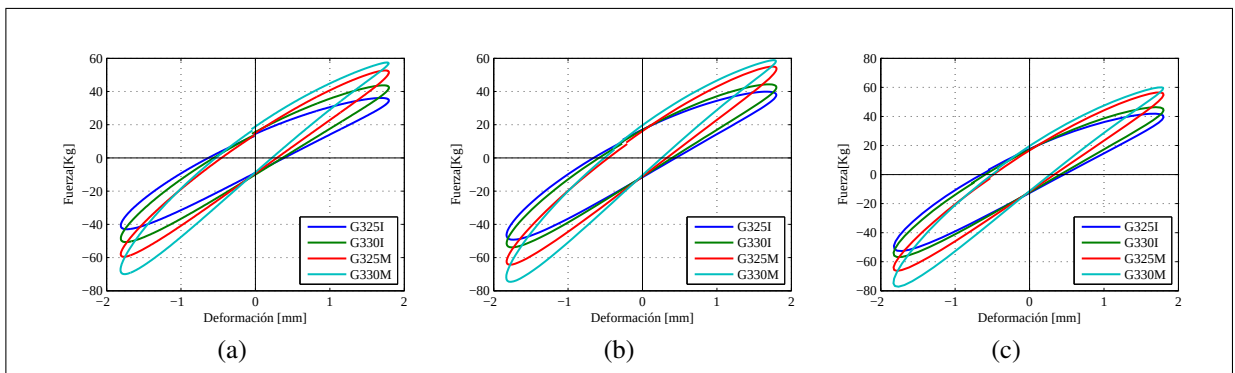


Figura A.8: Resultados pasivos G3 a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

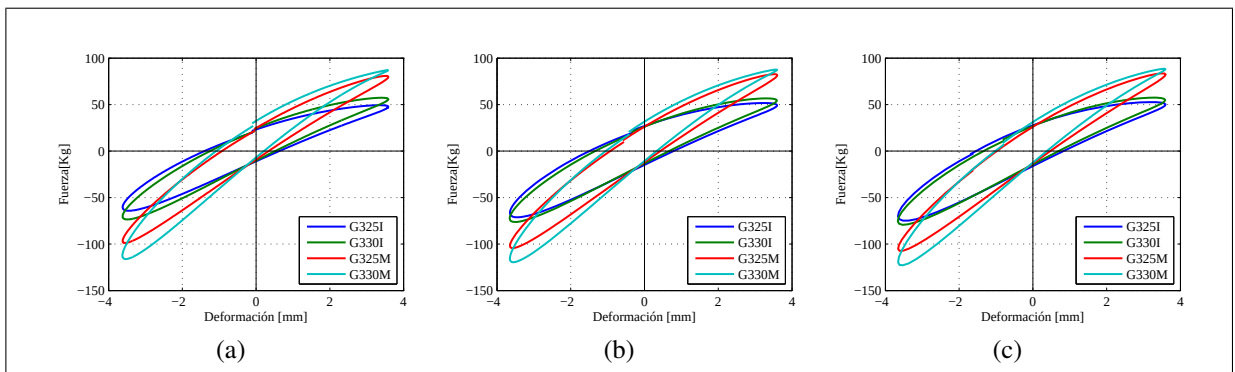


Figura A.9: Resultados pasivos G3 a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

ANEXO B. CURVAS DE RESPUESTA ACTIVA

B.1. G125I

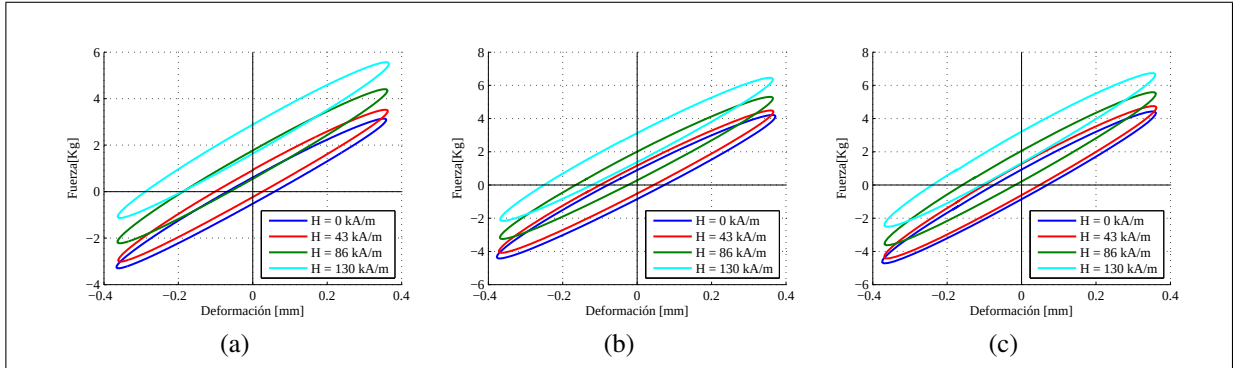


Figura B.1: Resultados activos G125I a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

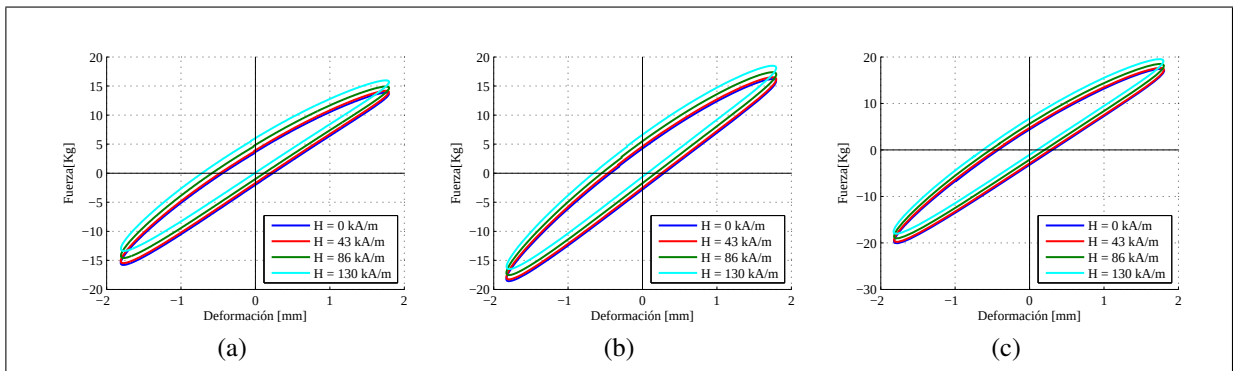


Figura B.2: Resultados activos G125I a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

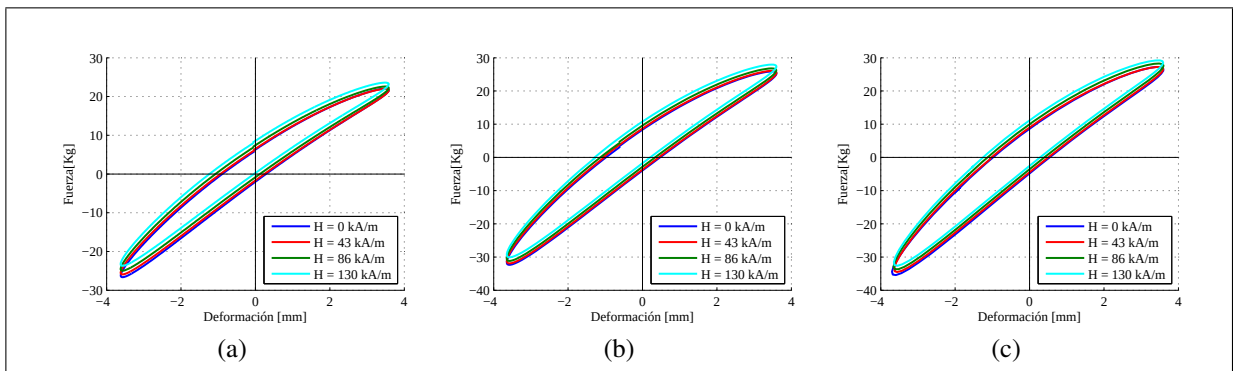


Figura B.3: Resultados activos G125I a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

B.2. G125M

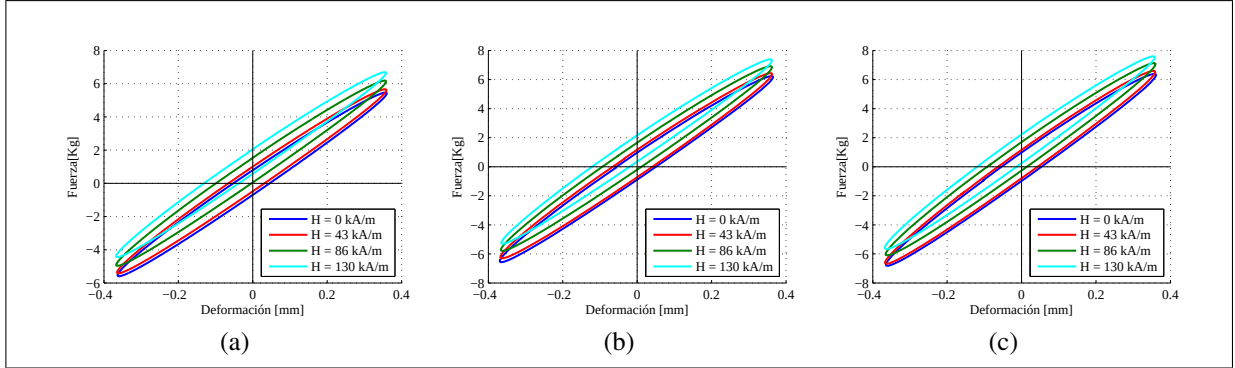


Figura B.4: Resultados activos G125M a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

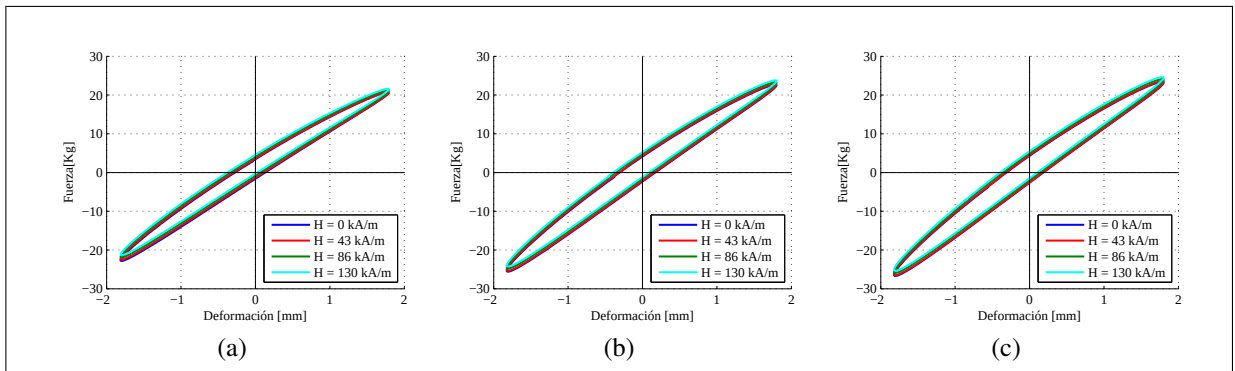


Figura B.5: Resultados activos G125M a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

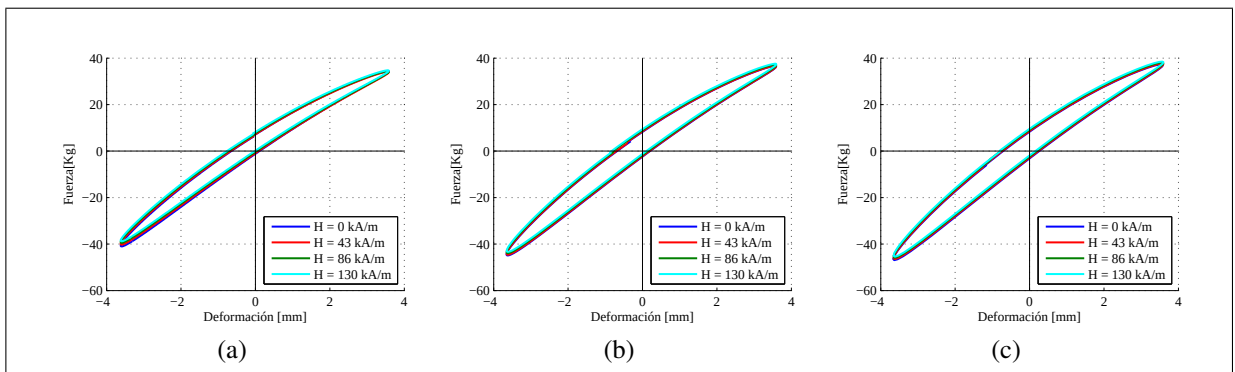


Figura B.6: Resultados activos G125M a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

B.3. G130I

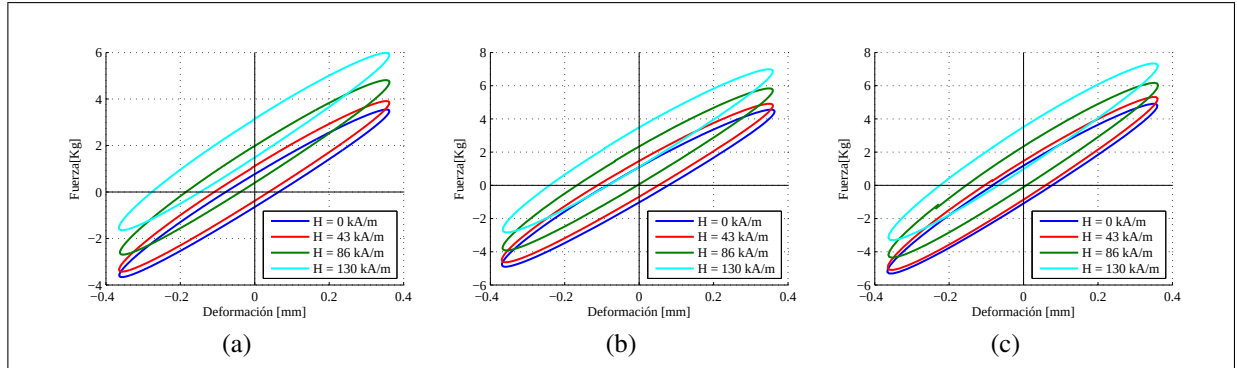


Figura B.7: Resultados activos G130I a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

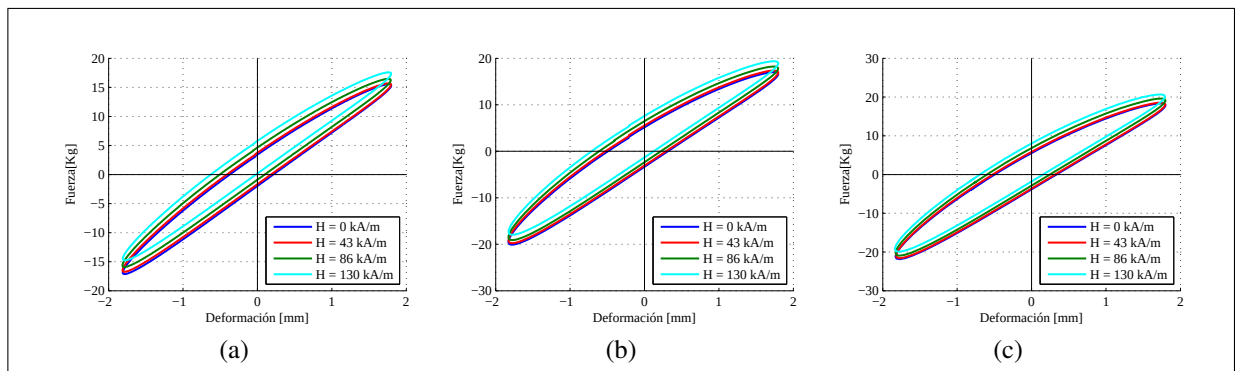


Figura B.8: Resultados activos G130I a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

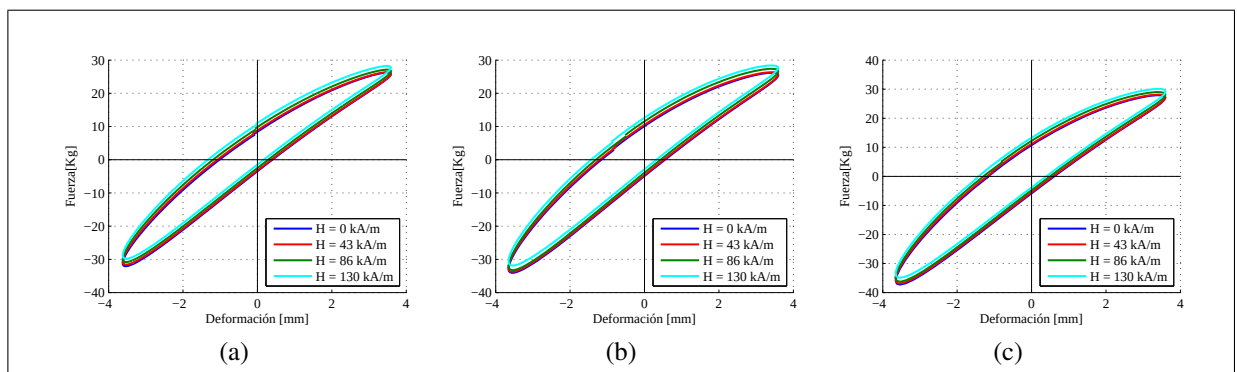


Figura B.9: Resultados activos G130I a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

B.4. G130M

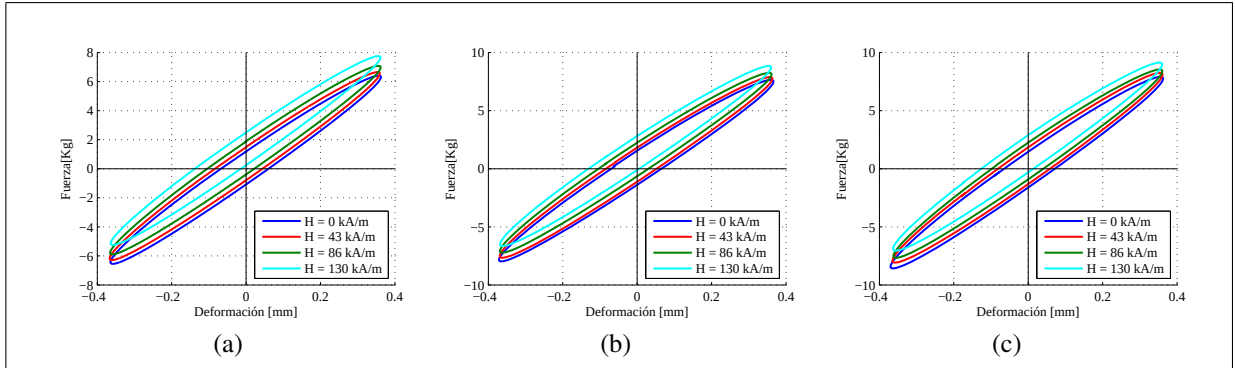


Figura B.10: Resultados activos G130M a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

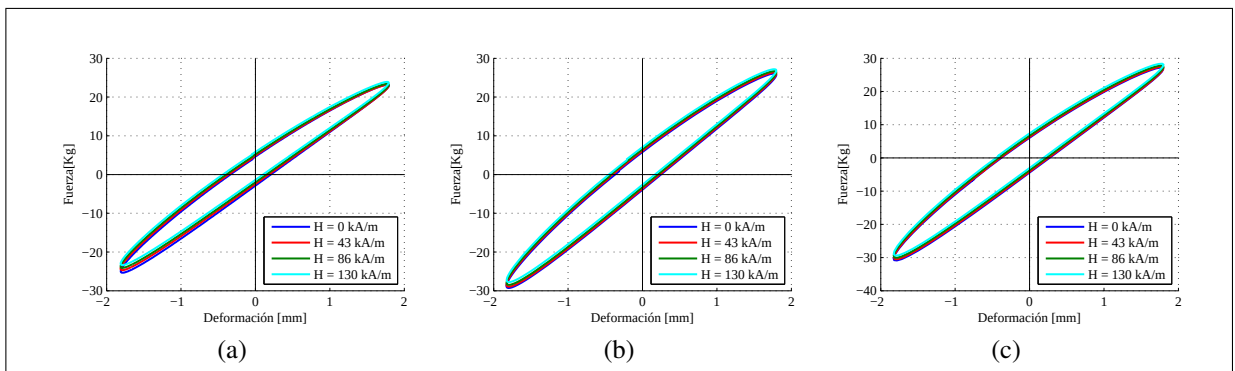


Figura B.11: Resultados activos G130M a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

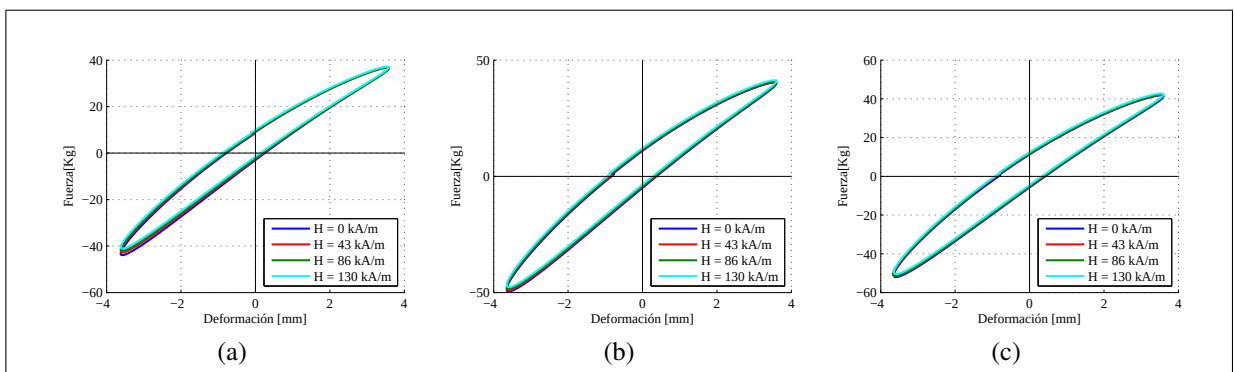


Figura B.12: Resultados activos G130M a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

B.5. G225I

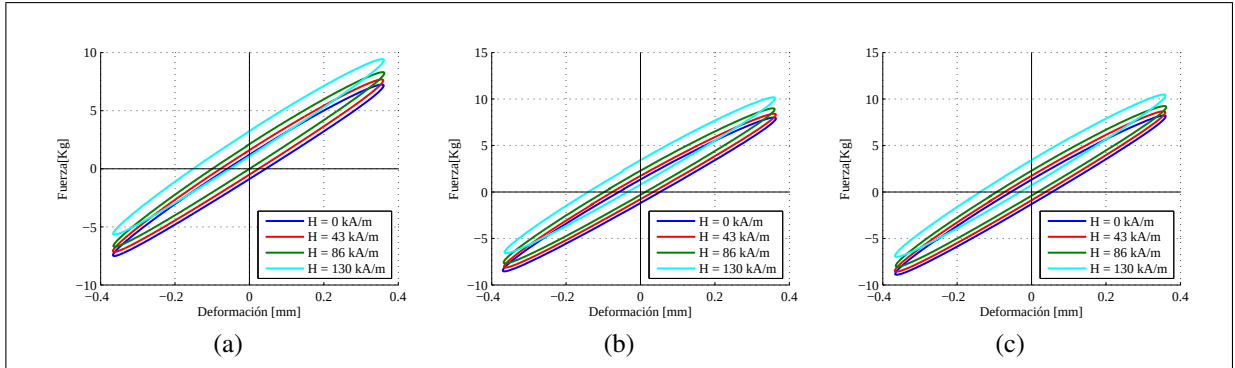


Figura B.13: Resultados activos G225I a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

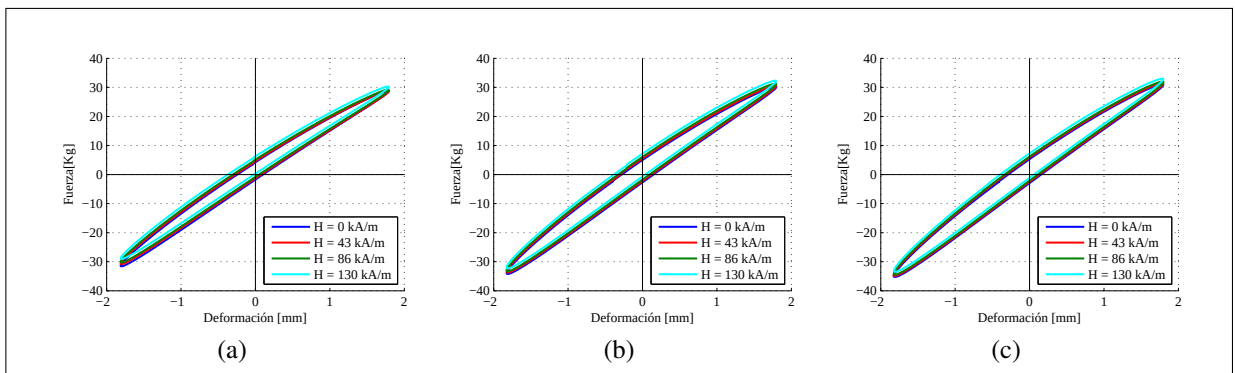


Figura B.14: Resultados activos G225I a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

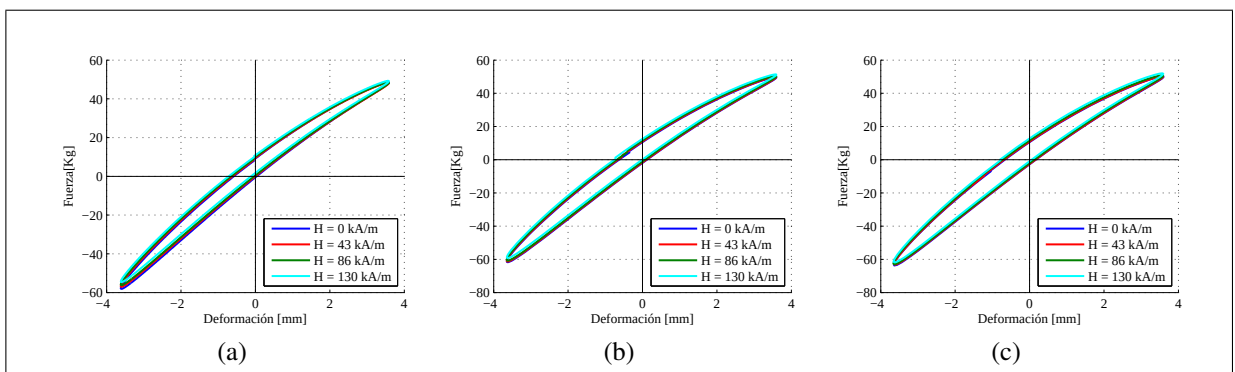


Figura B.15: Resultados activos G225I a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

B.6. G225M

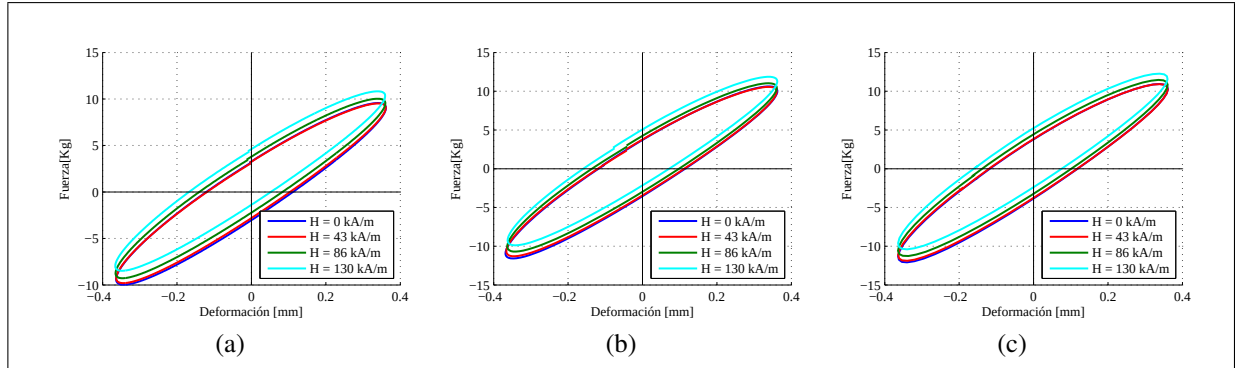


Figura B.16: Resultados activos G225M a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

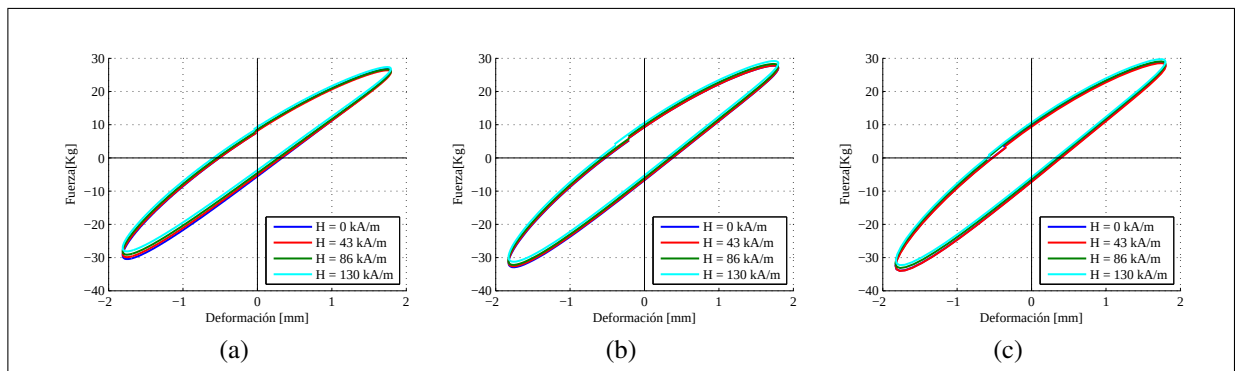


Figura B.17: Resultados activos G225M a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

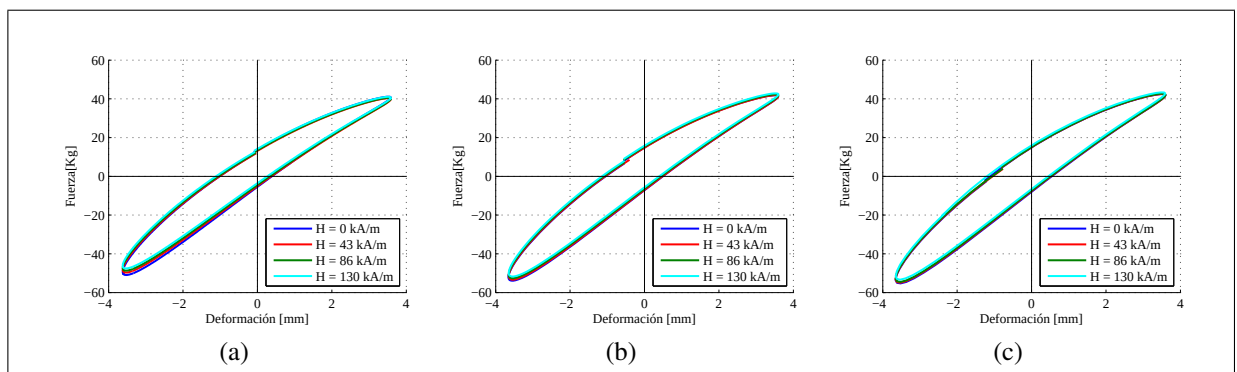


Figura B.18: Resultados activos G225M a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

B.7. G230I

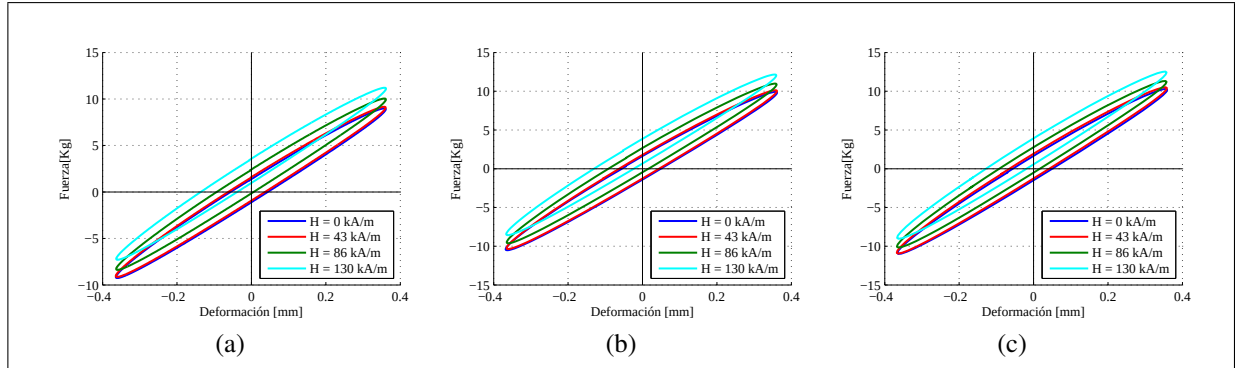


Figura B.19: Resultados activos G230I a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

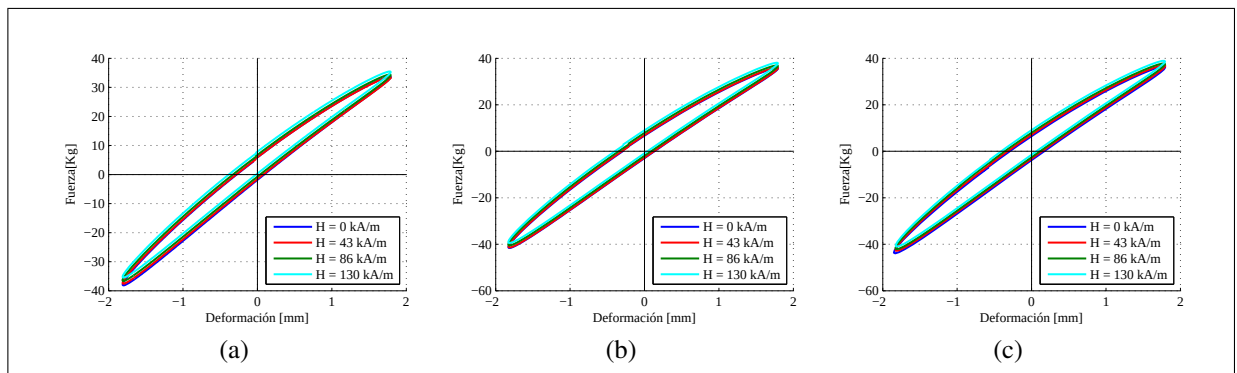


Figura B.20: Resultados activos G230I a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

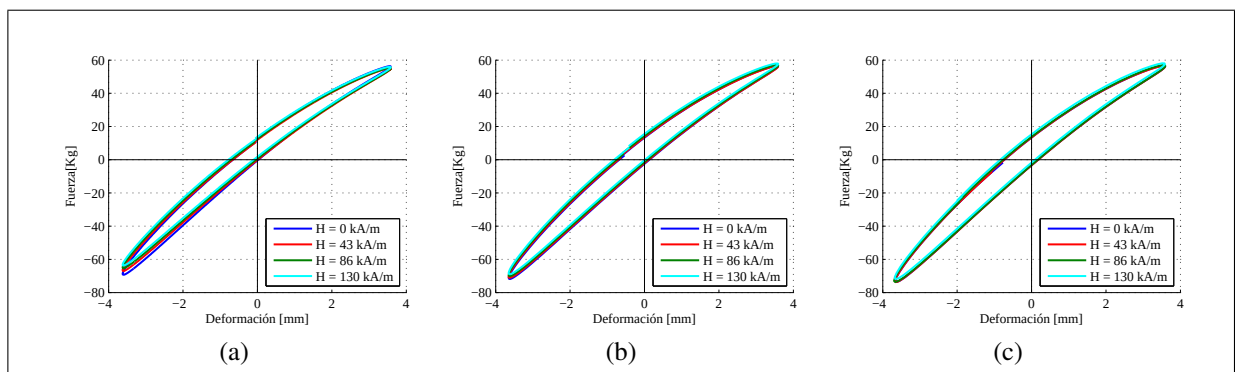


Figura B.21: Resultados activos G230I a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

B.8. G230M

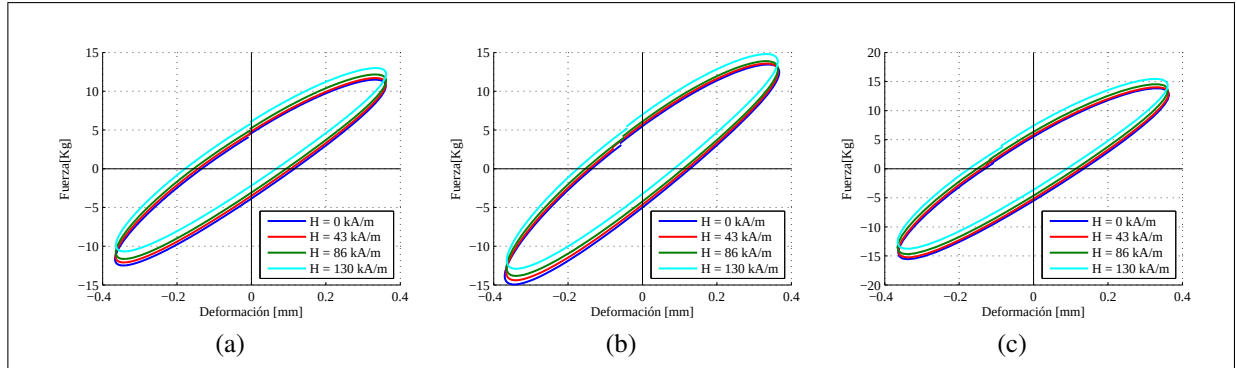


Figura B.22: Resultados activos G230M a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

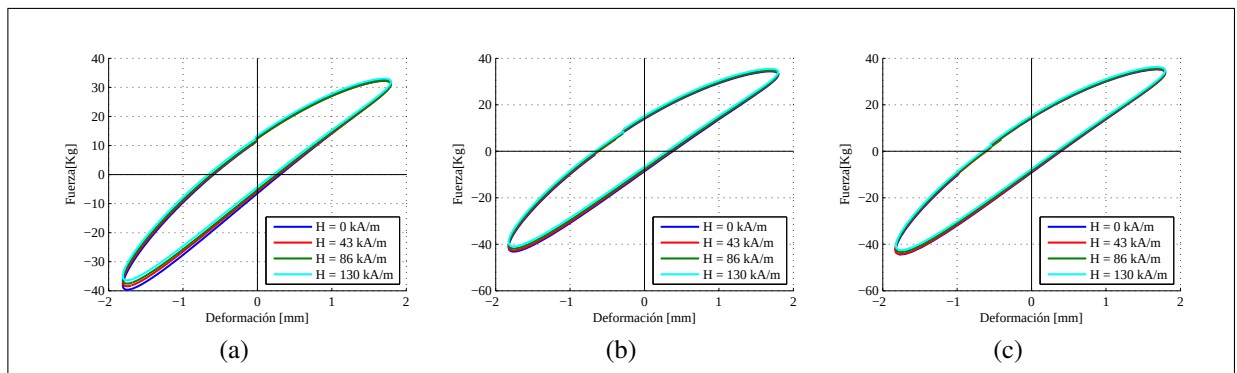


Figura B.23: Resultados activos G230M a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

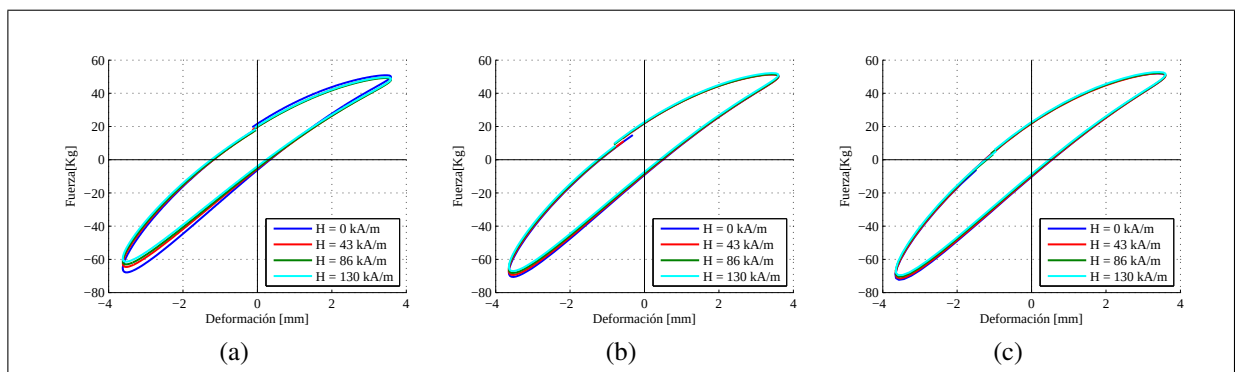


Figura B.24: Resultados activos G230M a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

B.9. G325I

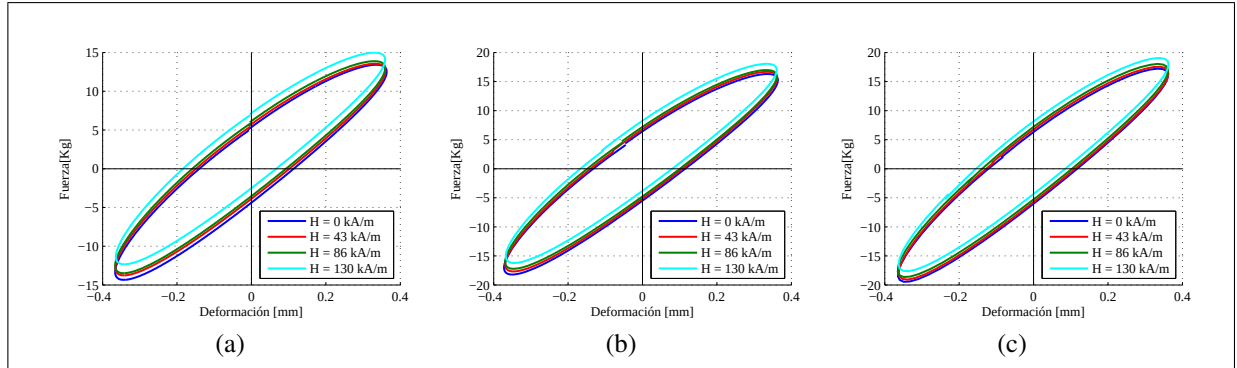


Figura B.25: Resultados activos G325I a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

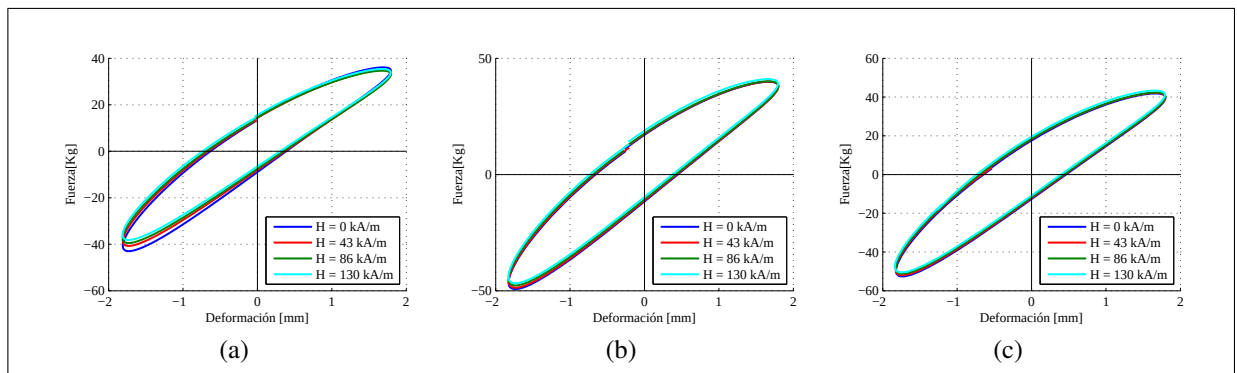


Figura B.26: Resultados activos G325I a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

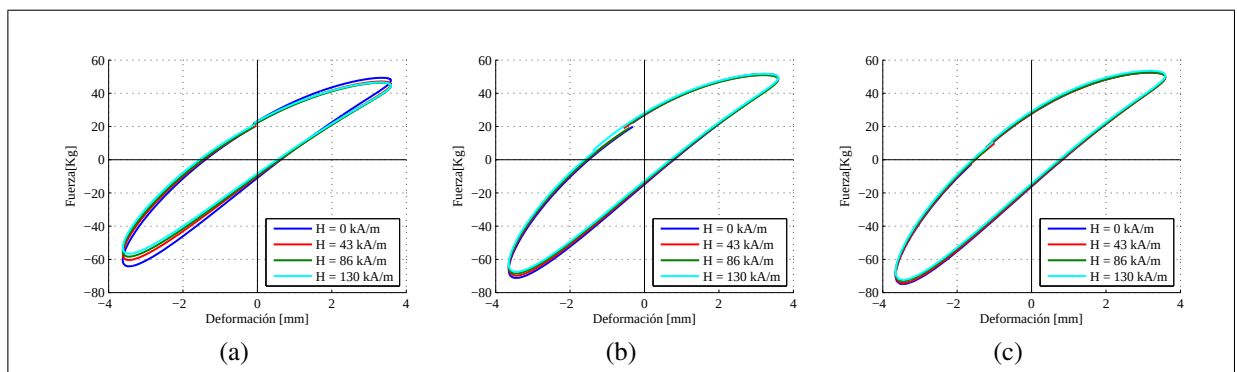


Figura B.27: Resultados activos G325I a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

B.10. G325M

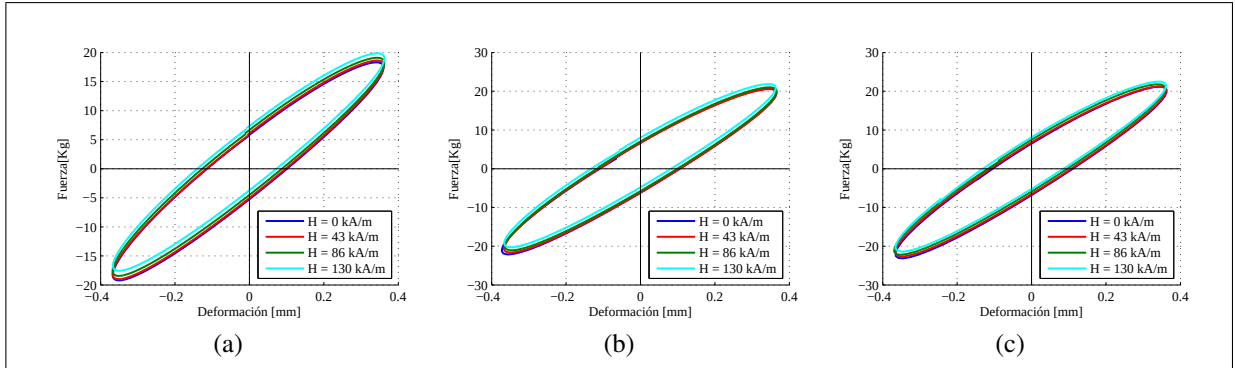


Figura B.28: Resultados activos G325M a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

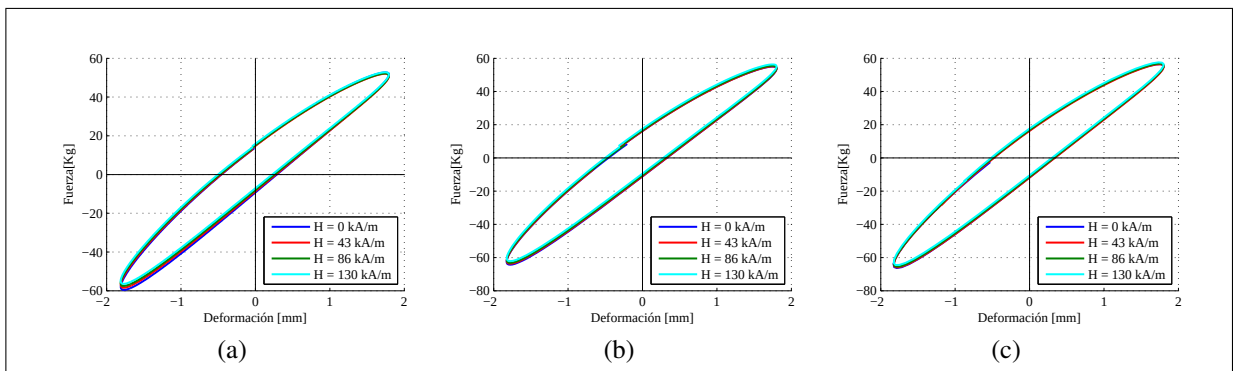


Figura B.29: Resultados activos G325M a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

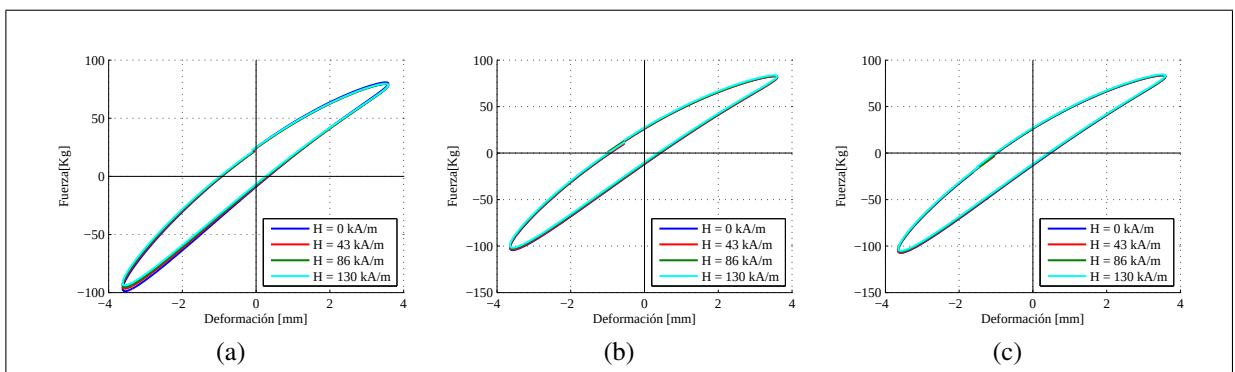


Figura B.30: Resultados activos G325M a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

B.11. G330I

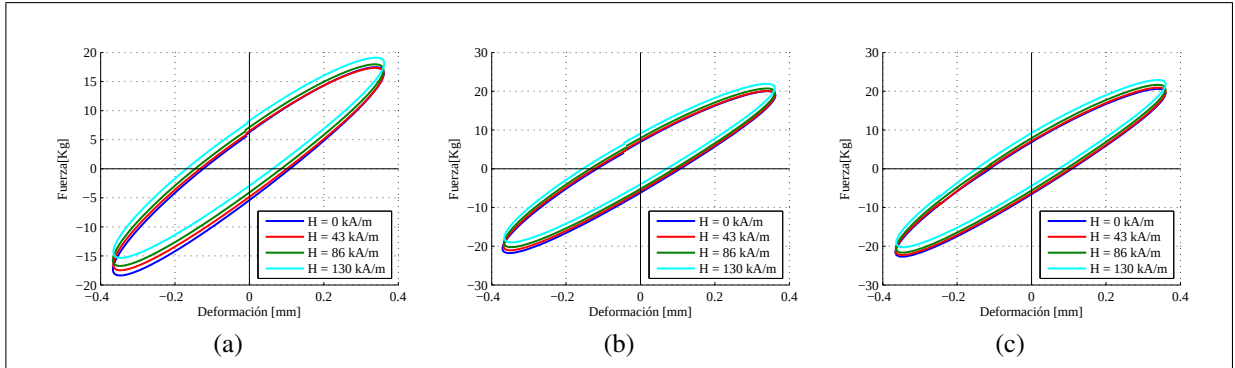


Figura B.31: Resultados activos G330I a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

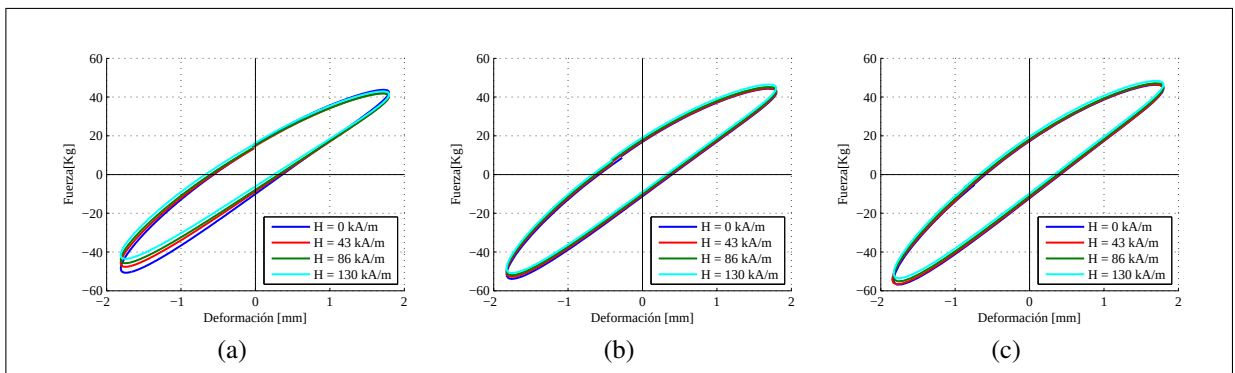


Figura B.32: Resultados activos G330I a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

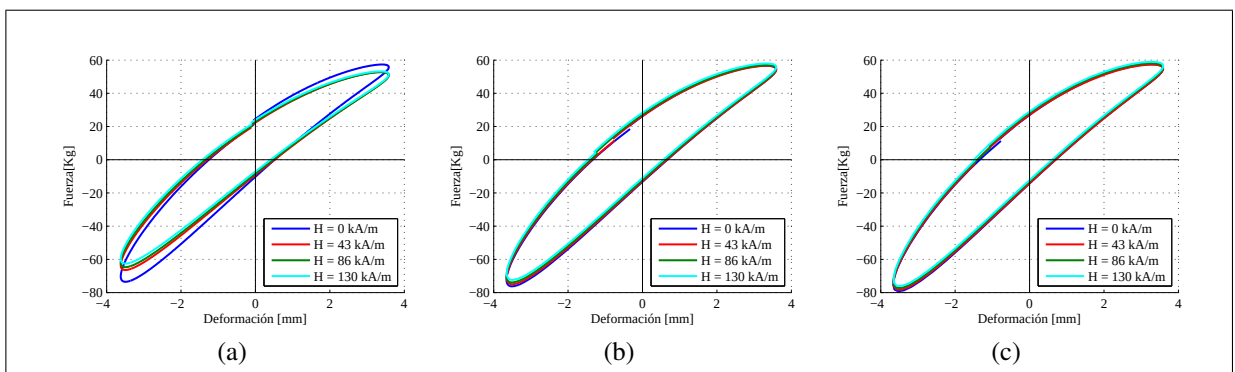


Figura B.33: Resultados activos G330I a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

B.12. G330M

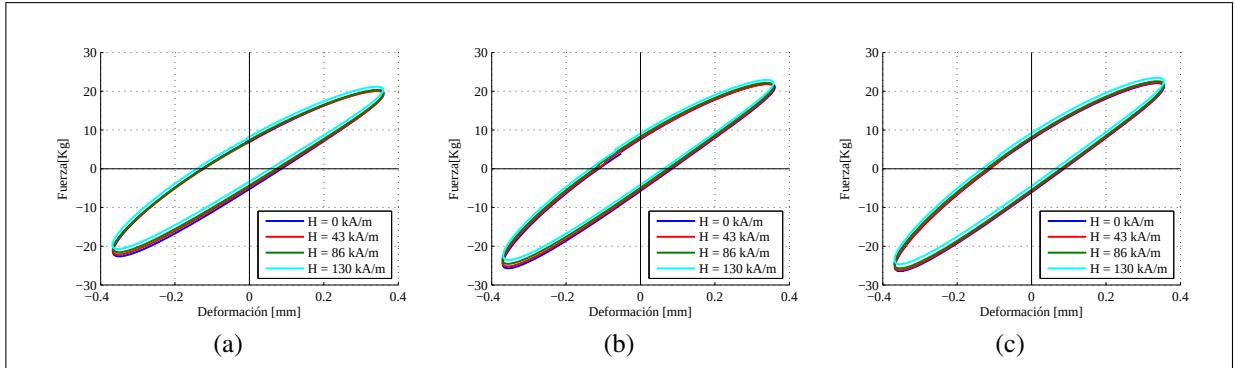


Figura B.34: Resultados activos G330M a 1 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

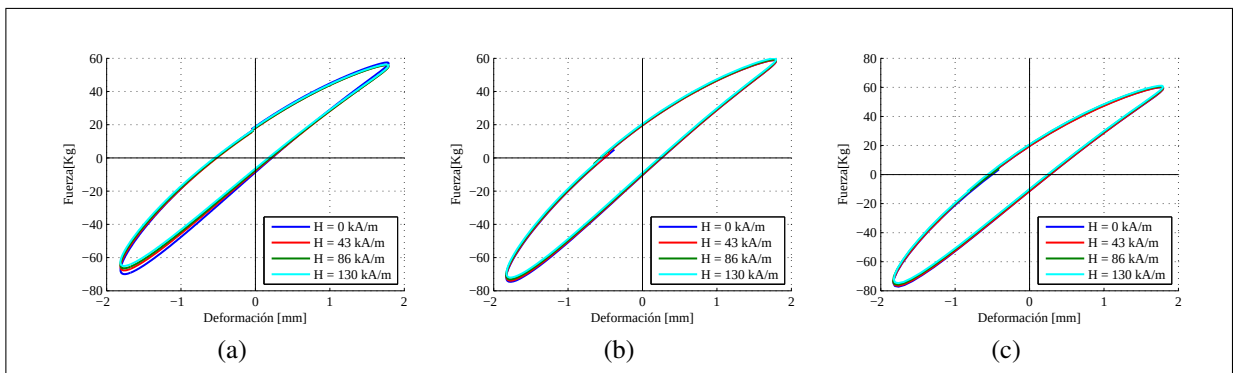


Figura B.35: Resultados activos G330M a 5 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

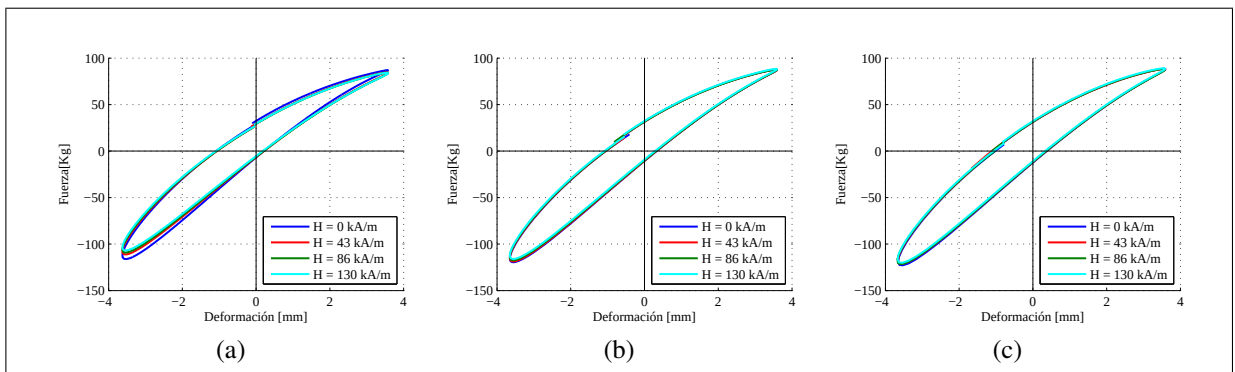


Figura B.36: Resultados activos G330M a 10 %. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2hz.

ANEXO C. CURVAS DE VARIACIÓN DE PARÁMETROS

C.1. Módulo de almacenamiento E'

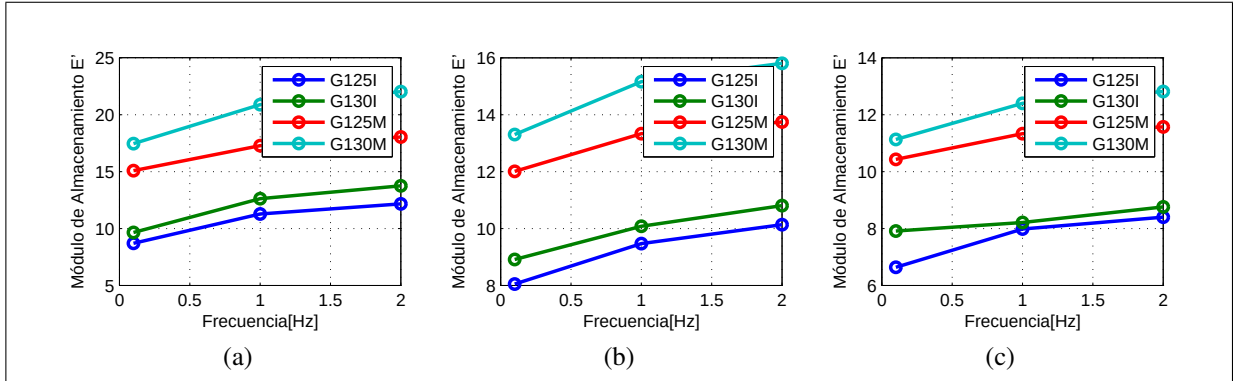


Figura C.1: E' para G1 a 0kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

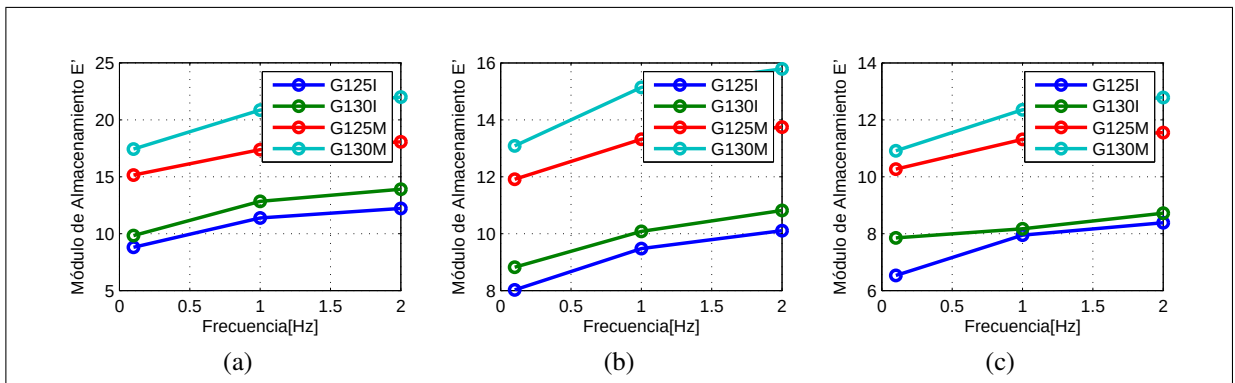


Figura C.2: E' para G1 a 43kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

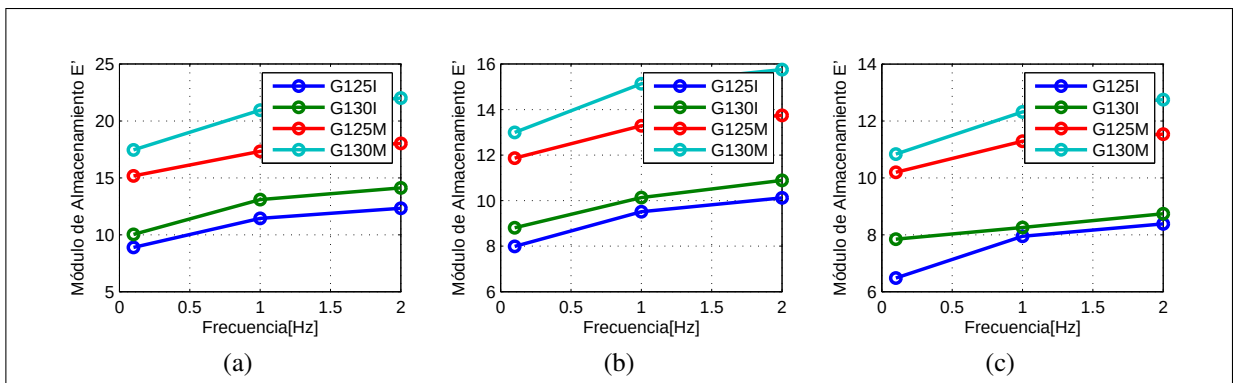


Figura C.3: E' para G1 a 86kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

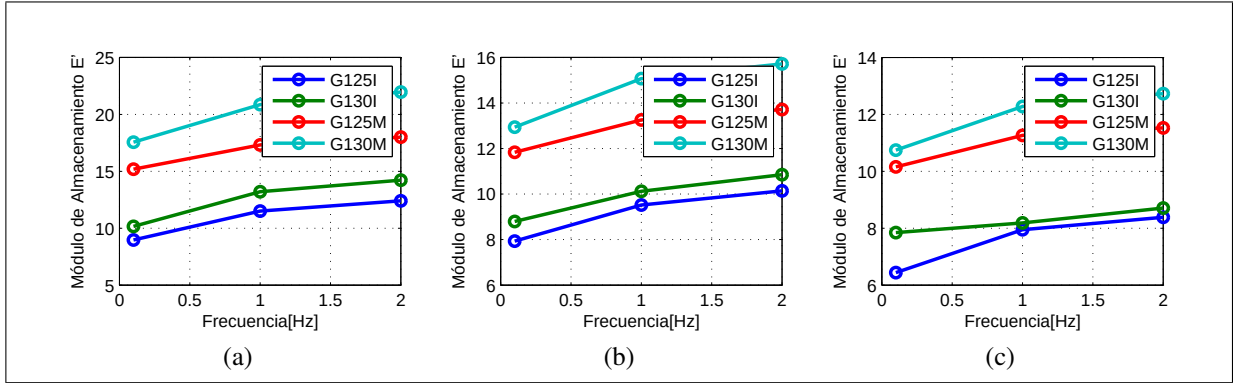


Figura C.4: E' para G1 a 130kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

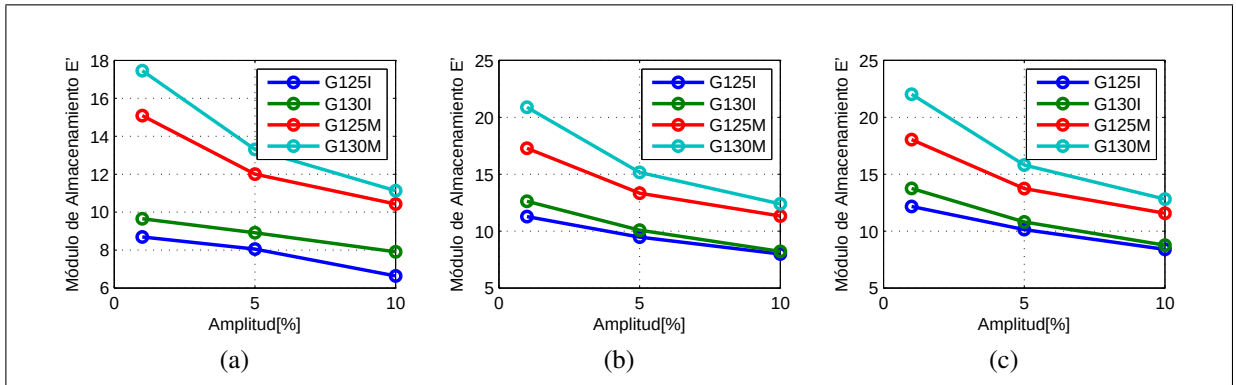


Figura C.5: E' para G1 a 0kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

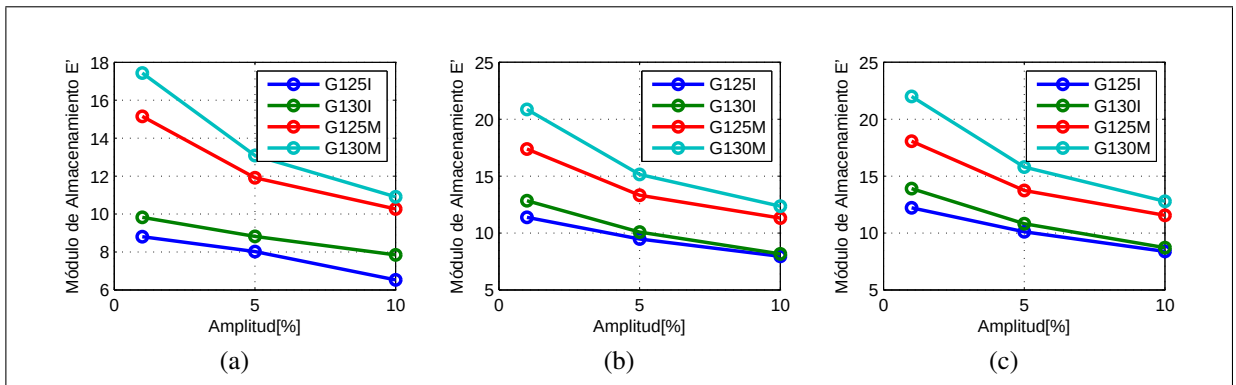


Figura C.6: E' para G1 a 43kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

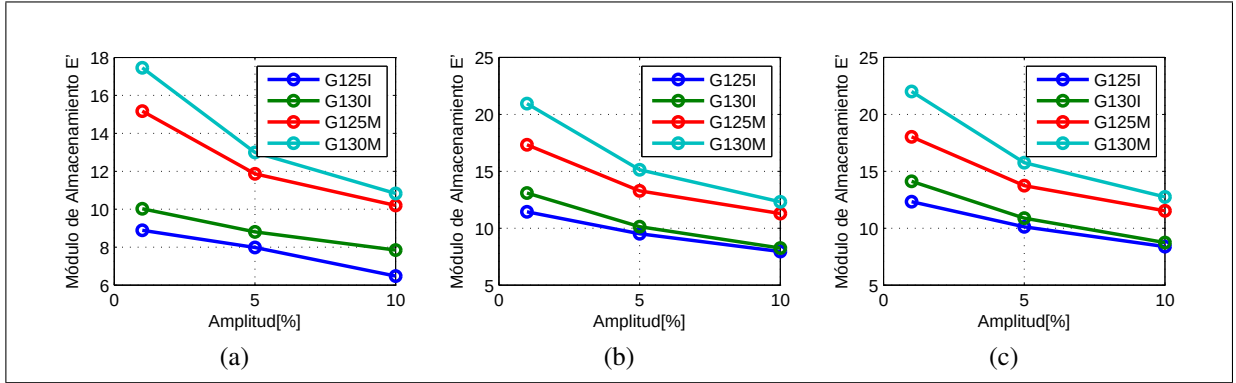


Figura C.7: E' para G1 a 86kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

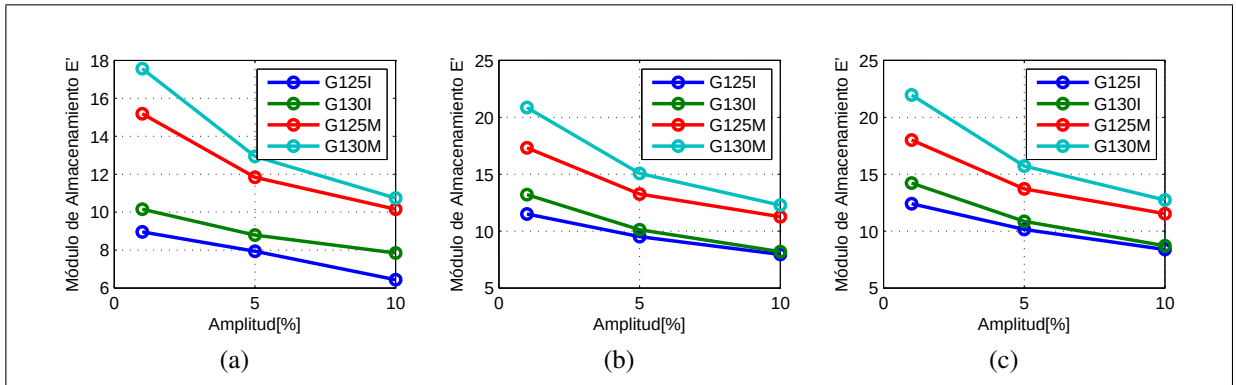


Figura C.8: E' para G1 a 130kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

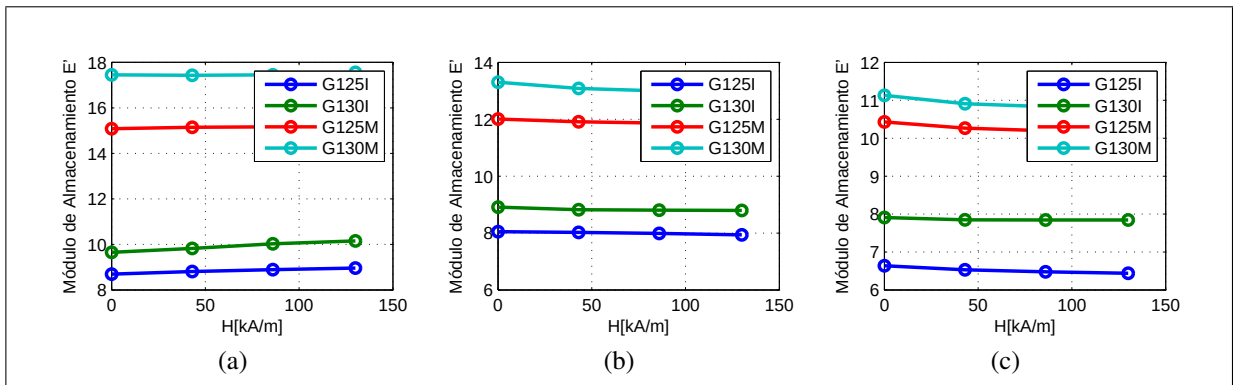


Figura C.9: E' para G1 a 0.1Hz. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

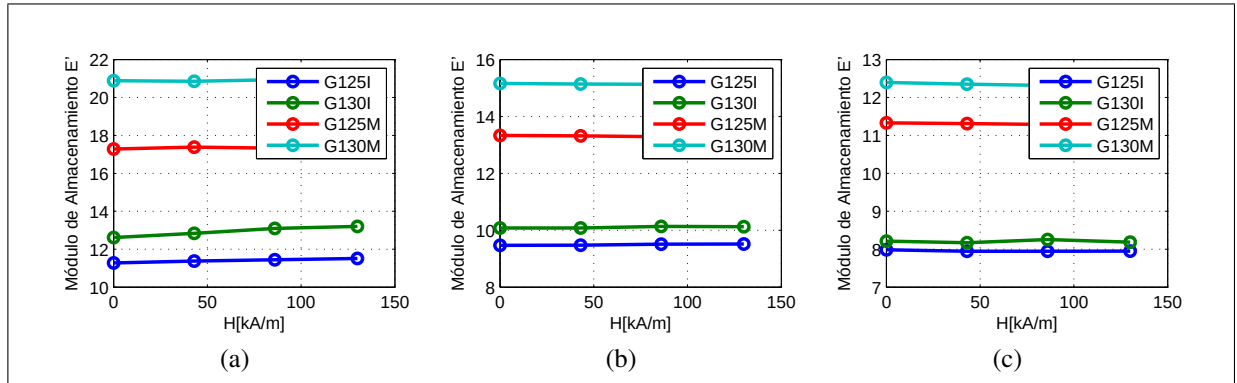


Figura C.10: E' para G1 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

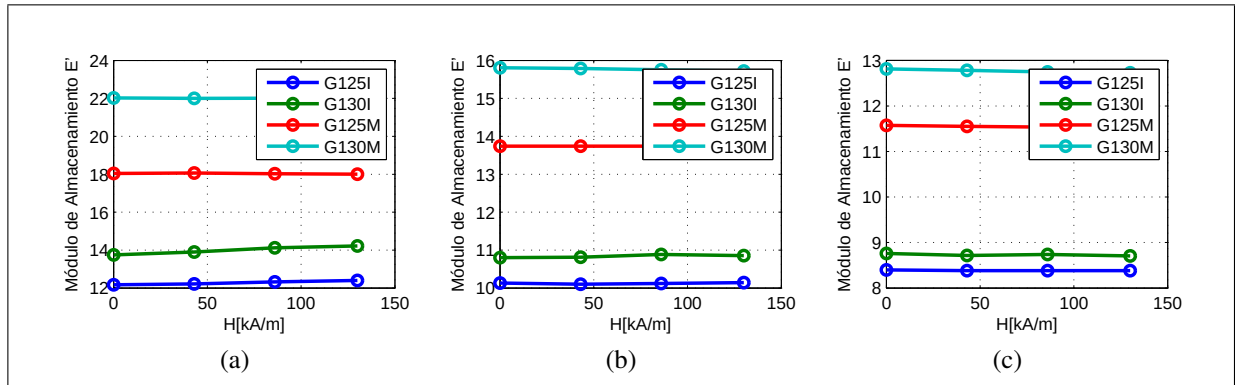


Figura C.11: E' para G1 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

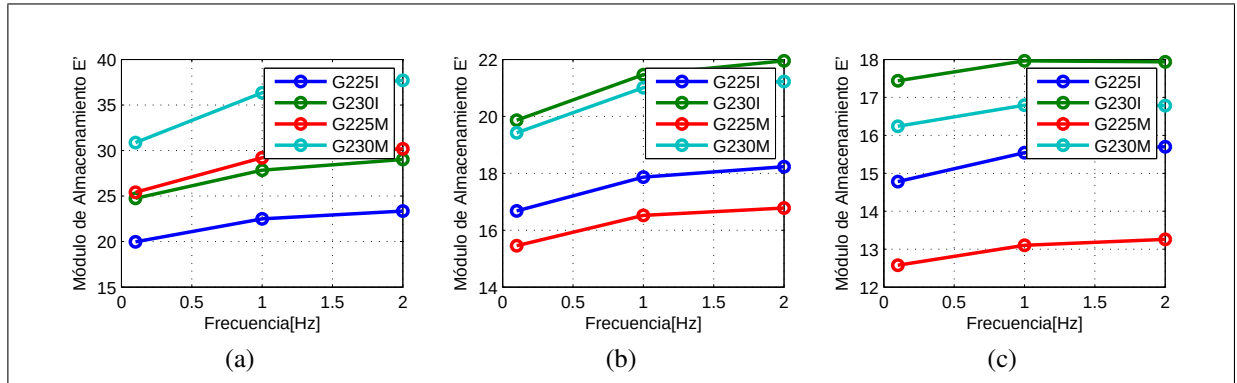


Figura C.12: E' para G2 a 0kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

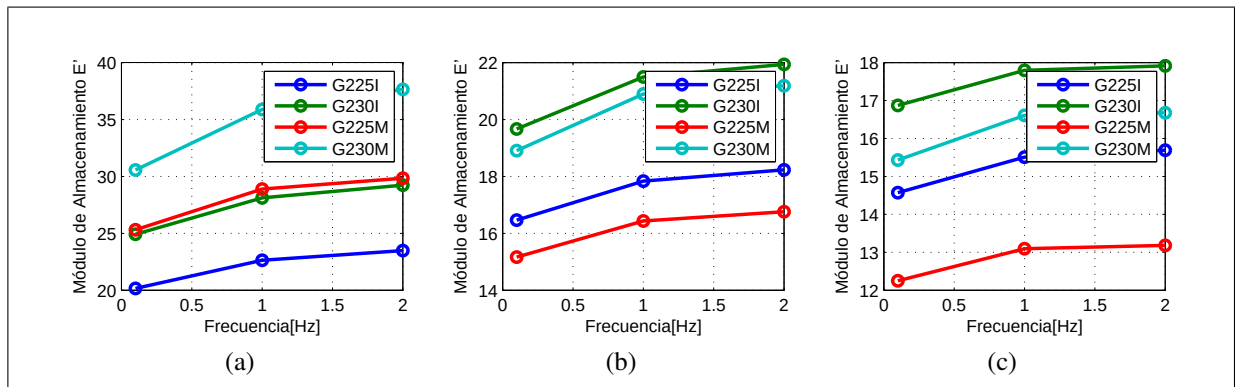


Figura C.13: E' para G2 a 43kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

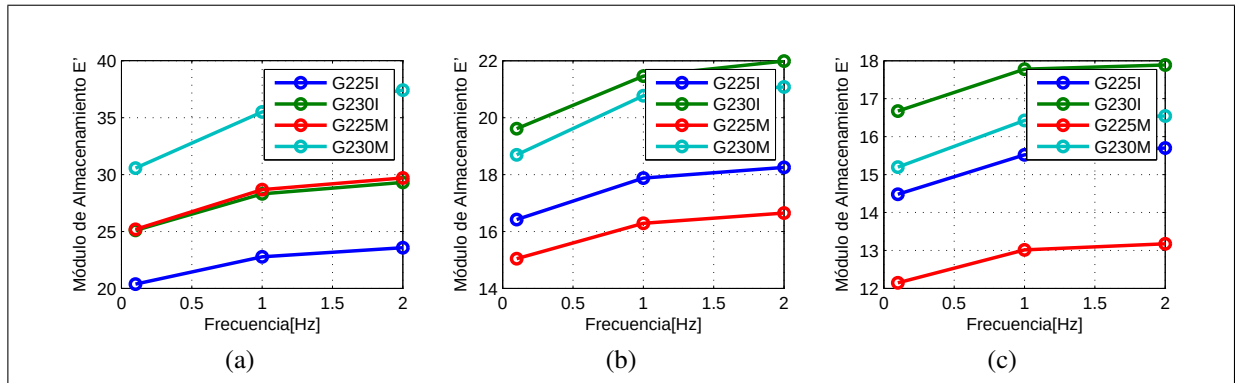


Figura C.14: E' para G2 a 86kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

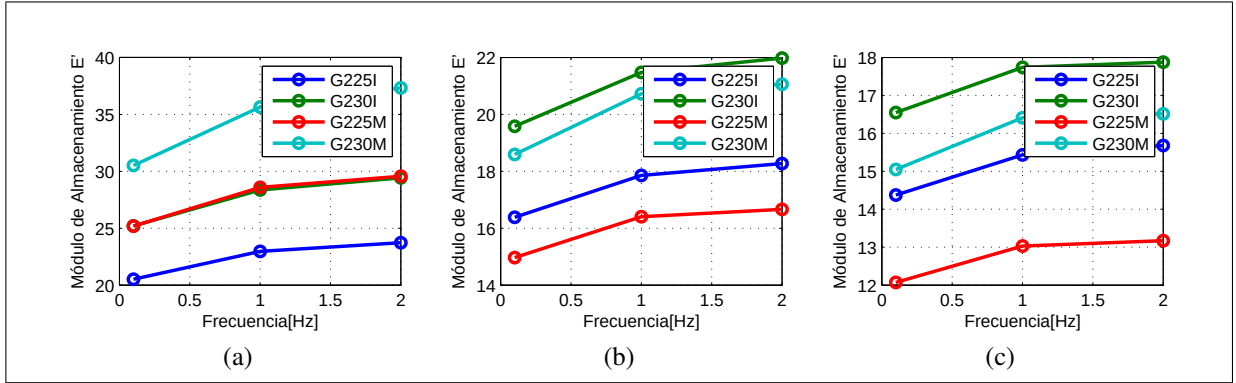


Figura C.15: E' para G2 a 130kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

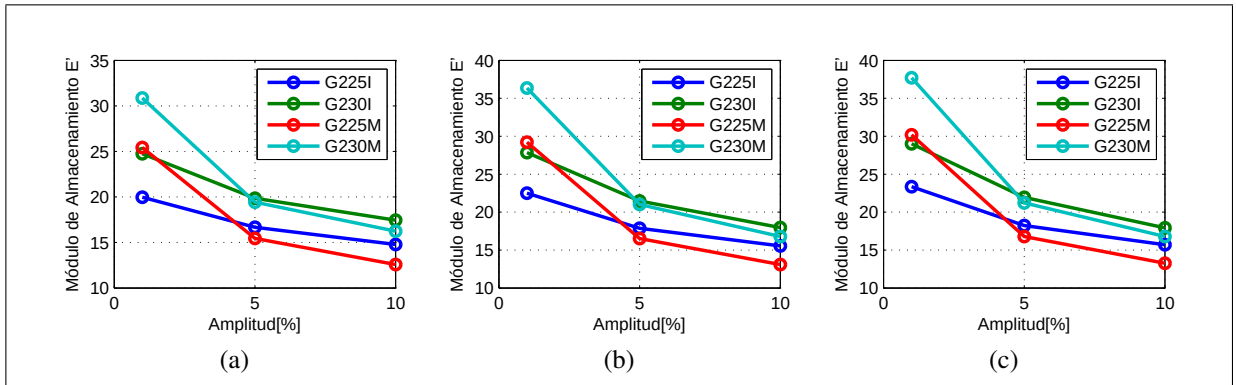


Figura C.16: E' para G2 a 0kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

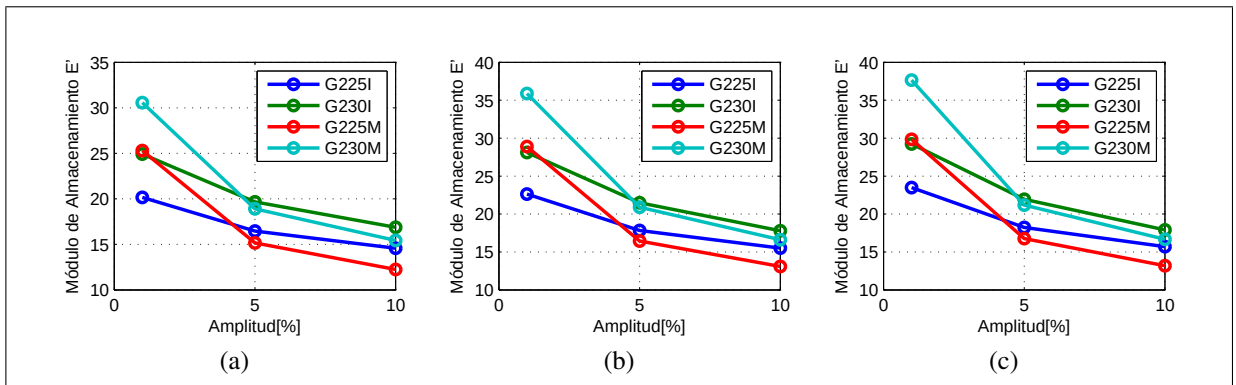


Figura C.17: E' para G2 a 43kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

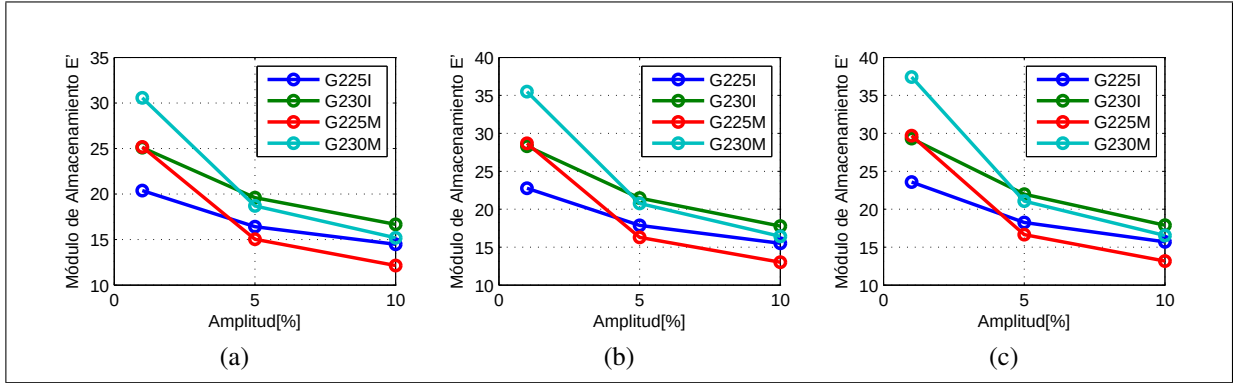


Figura C.18: E' para G2 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.

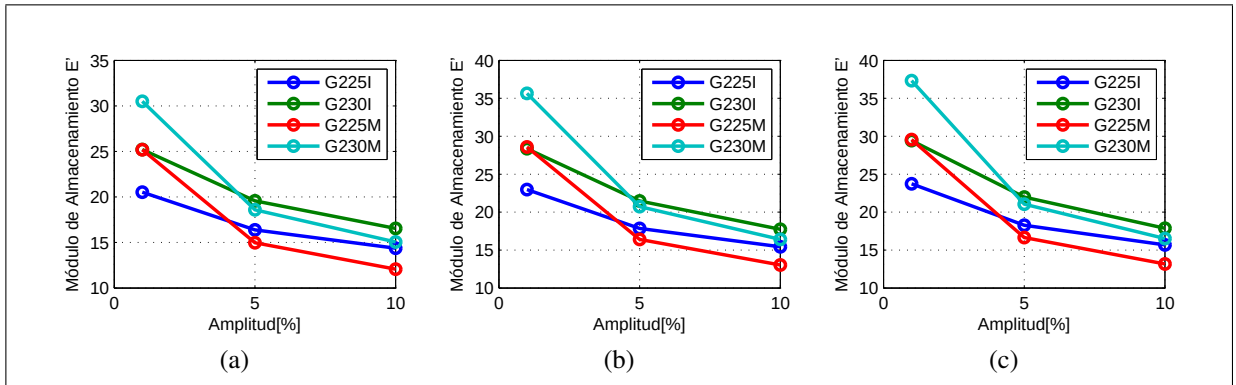


Figura C.19: E' para G2 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.

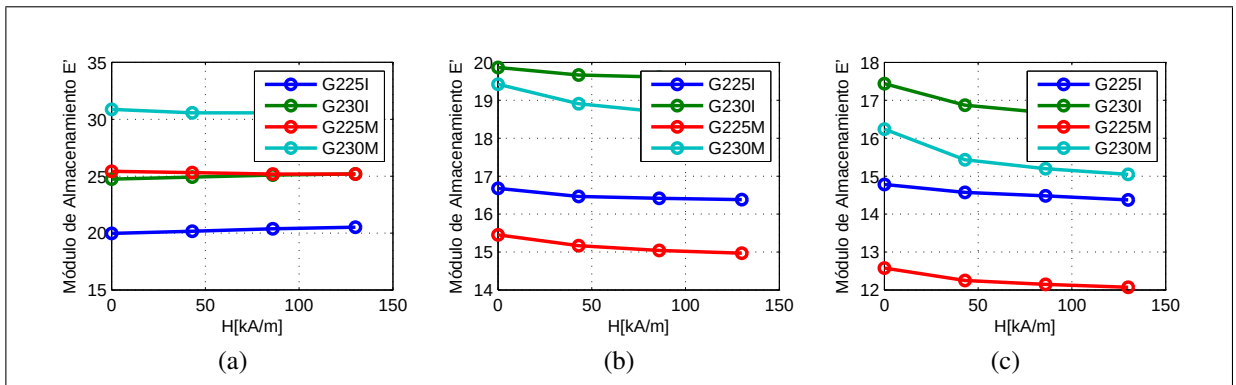


Figura C.20: E' para G2 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

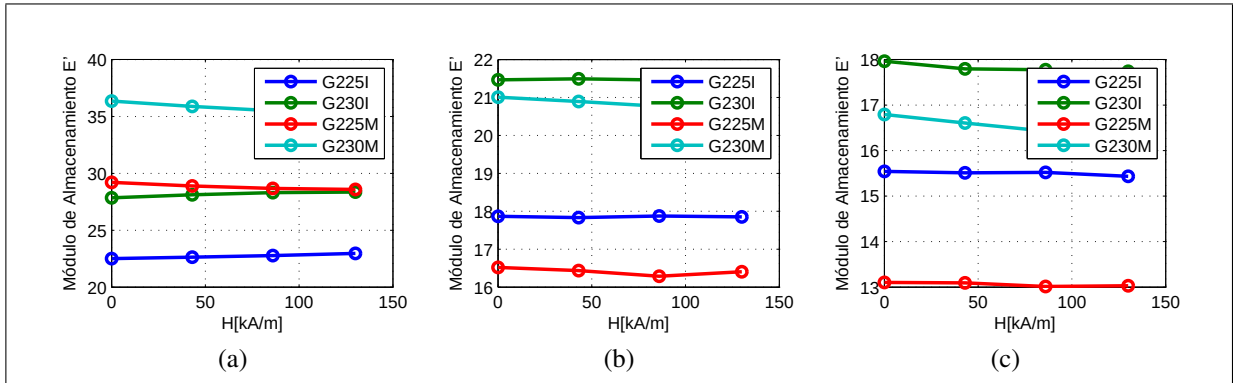


Figura C.21: E' para G2 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

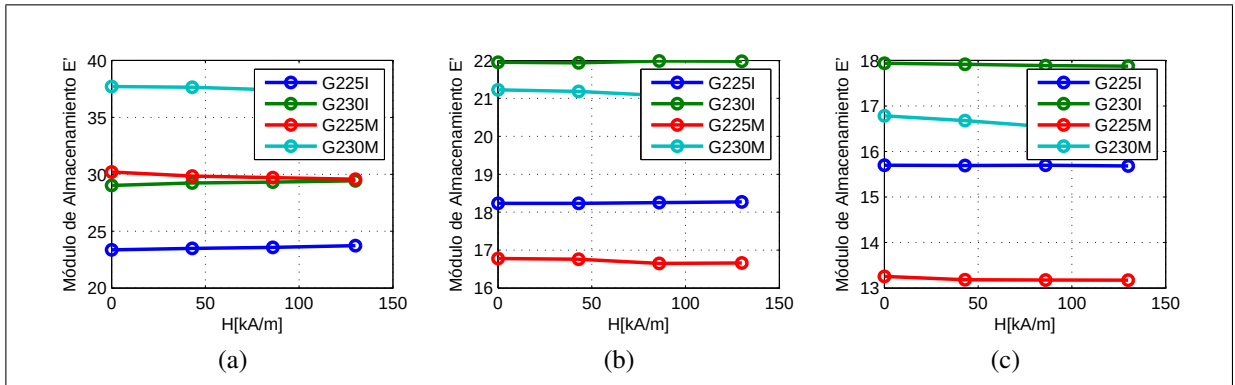


Figura C.22: E' para G2 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

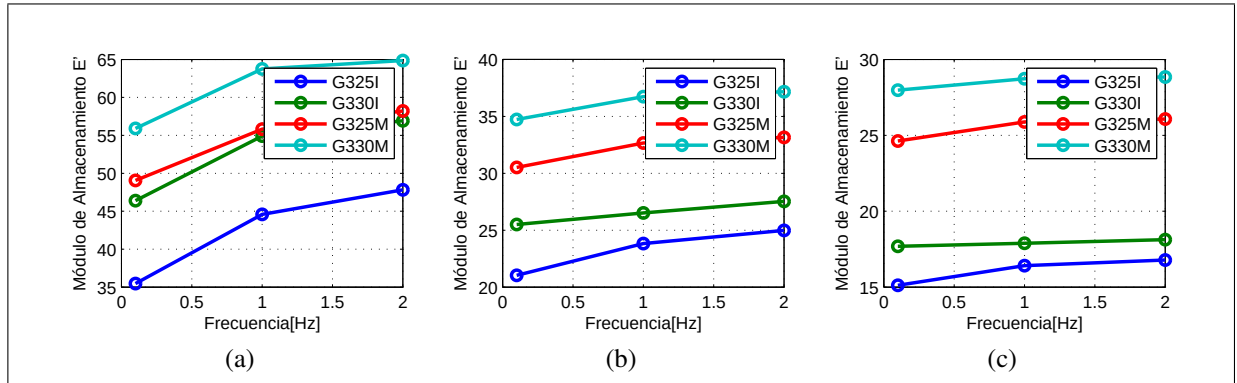


Figura C.23: E' para G3 a 0kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

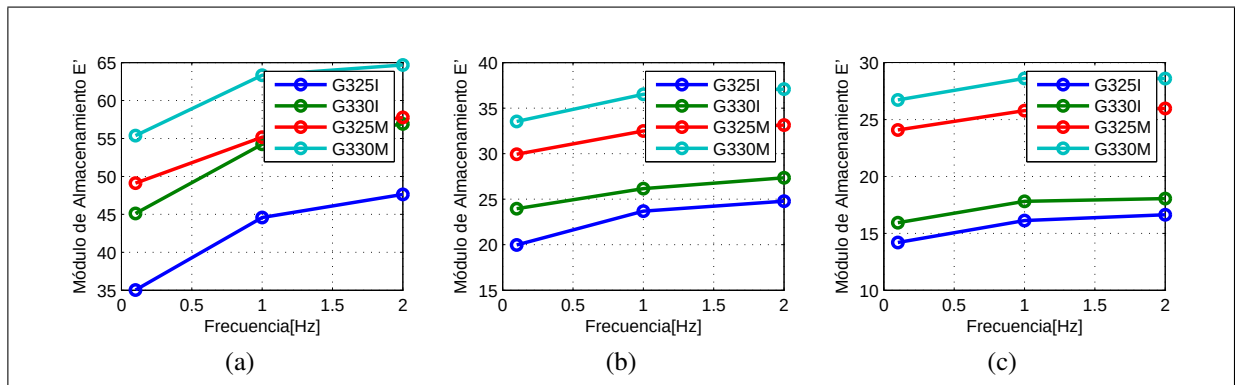


Figura C.24: E' para G3 a 43kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

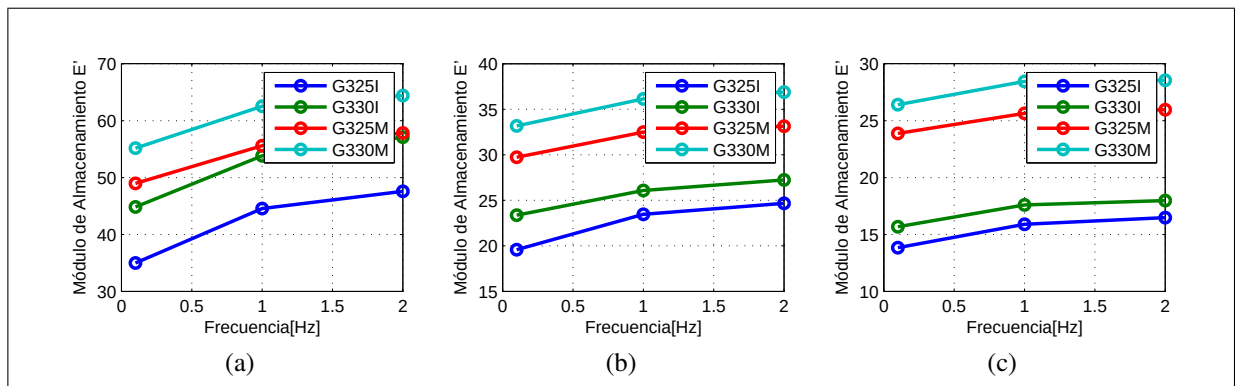


Figura C.25: E' para G3 a 86kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

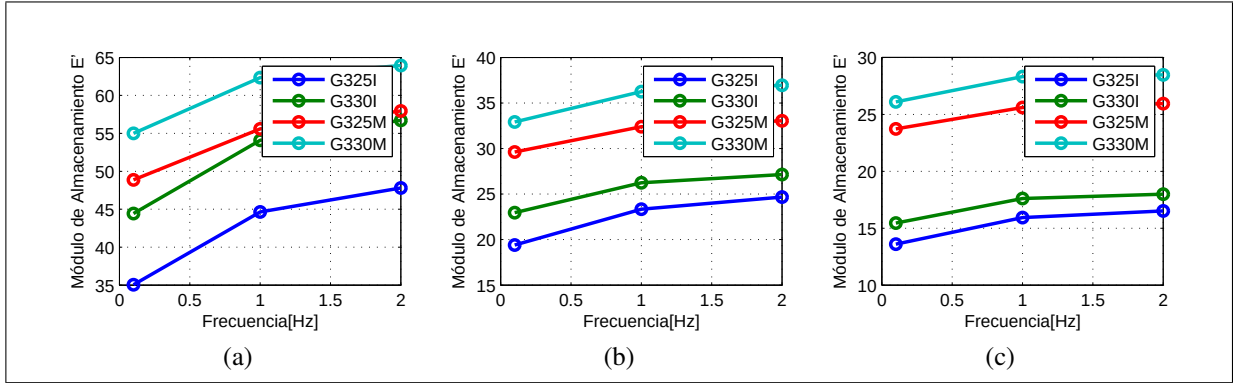


Figura C.26: E' para G3 a 130kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

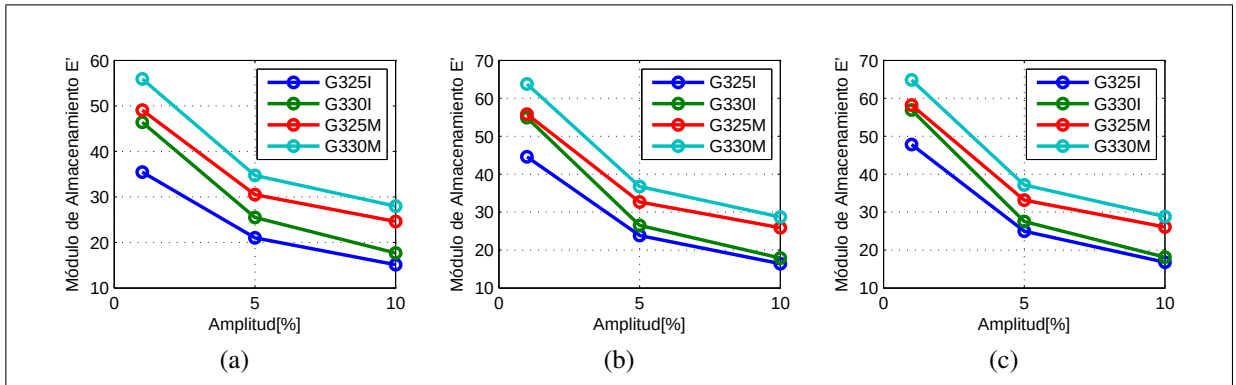


Figura C.27: E' para G3 a 0kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

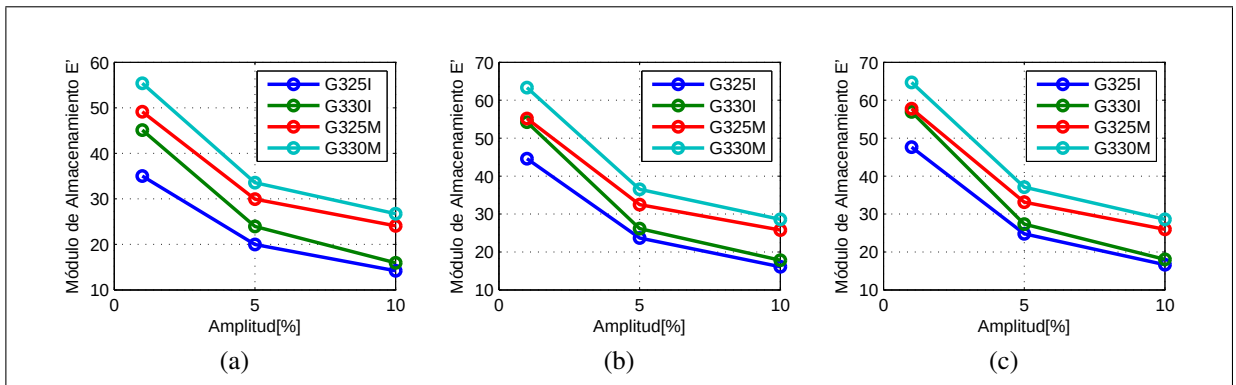


Figura C.28: E' para G3 a 43kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

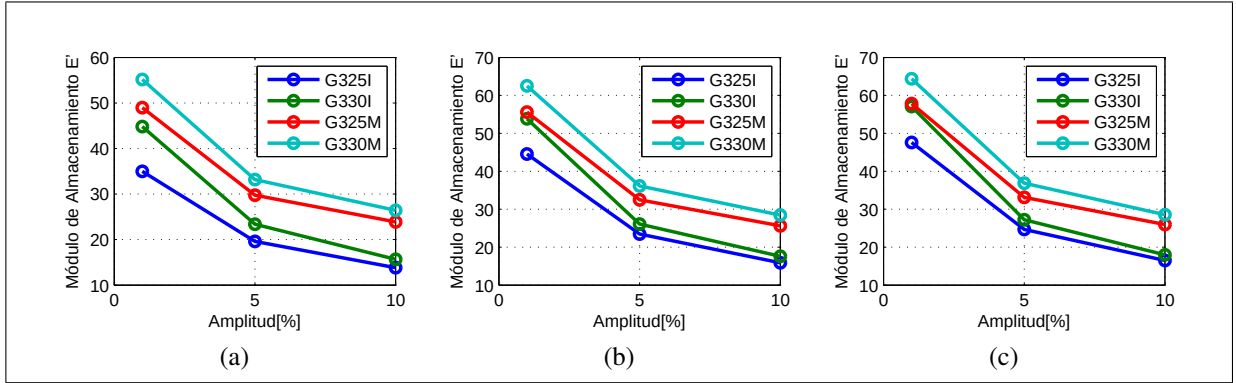


Figura C.29: E' para G3 a 86kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

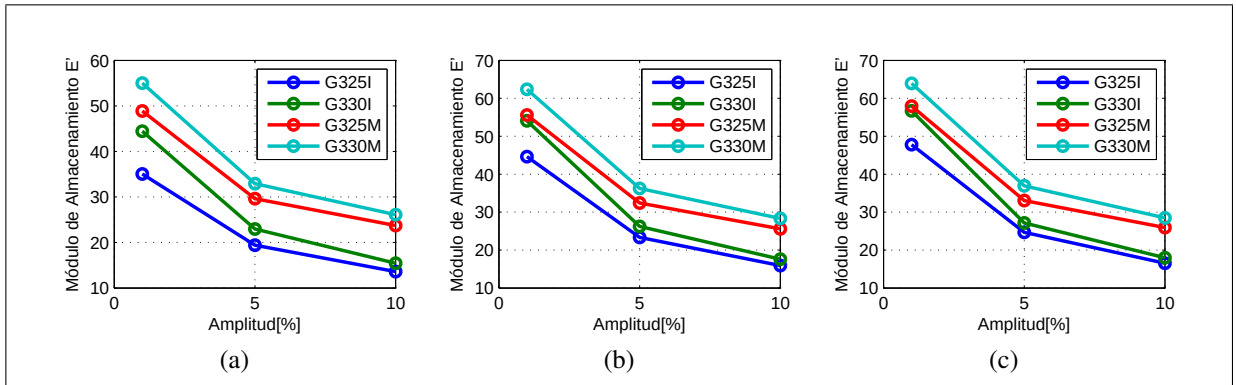


Figura C.30: E' para G3 a 130kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

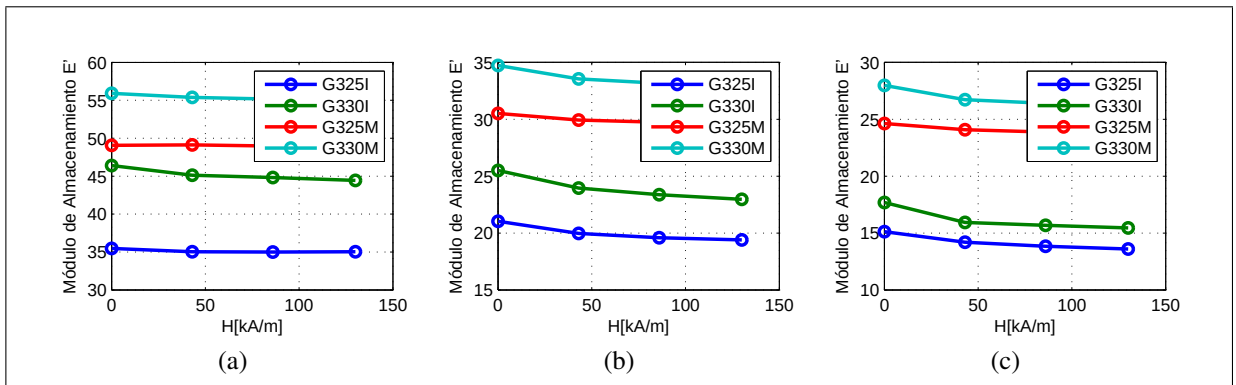


Figura C.31: E' para G3 a 0.1Hz. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

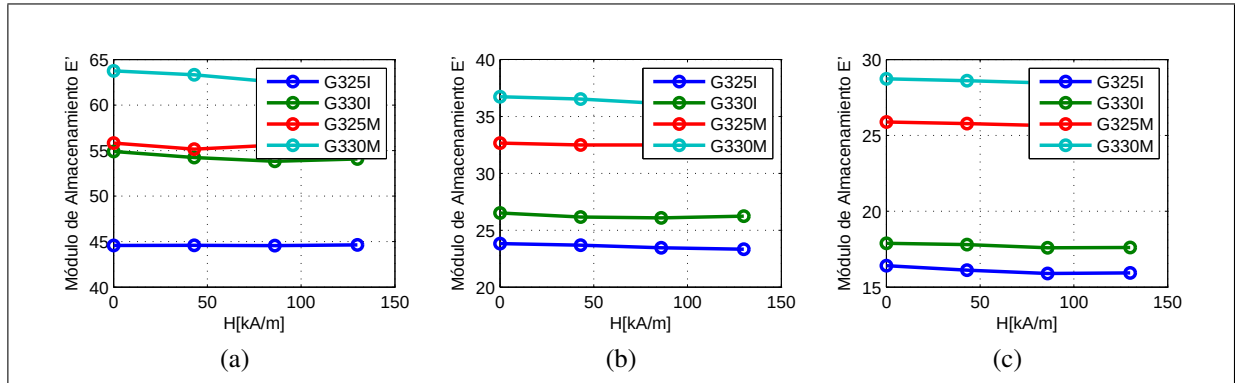


Figura C.32: E' para G3 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

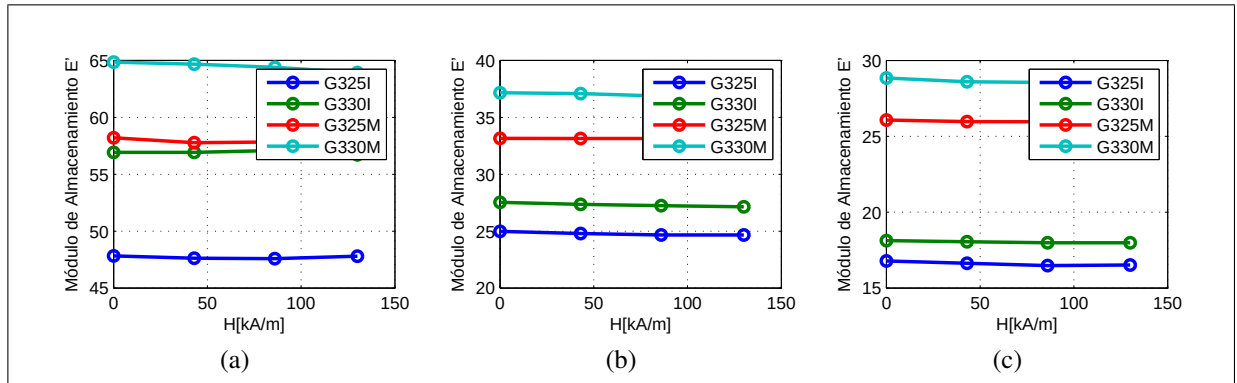


Figura C.33: E' para G3 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

C.2. Módulo de pérdida E''

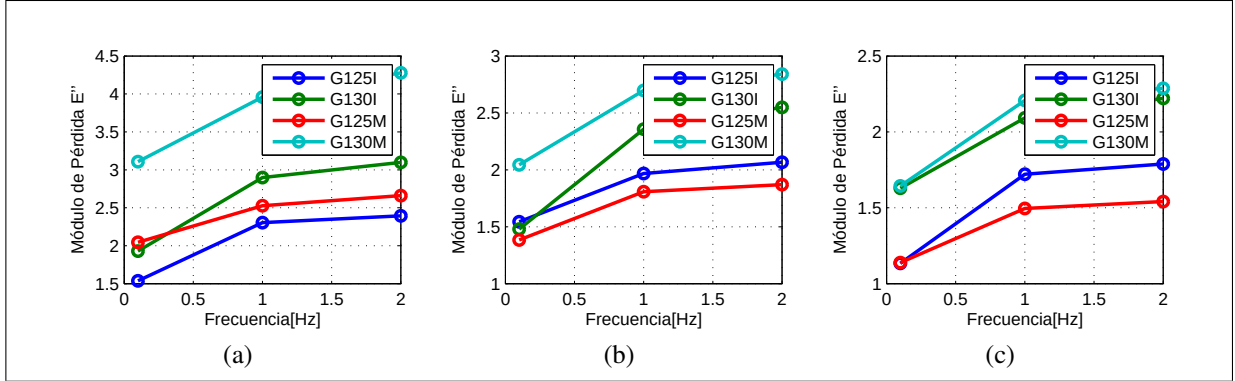


Figura C.34: E'' para G1 a 0kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

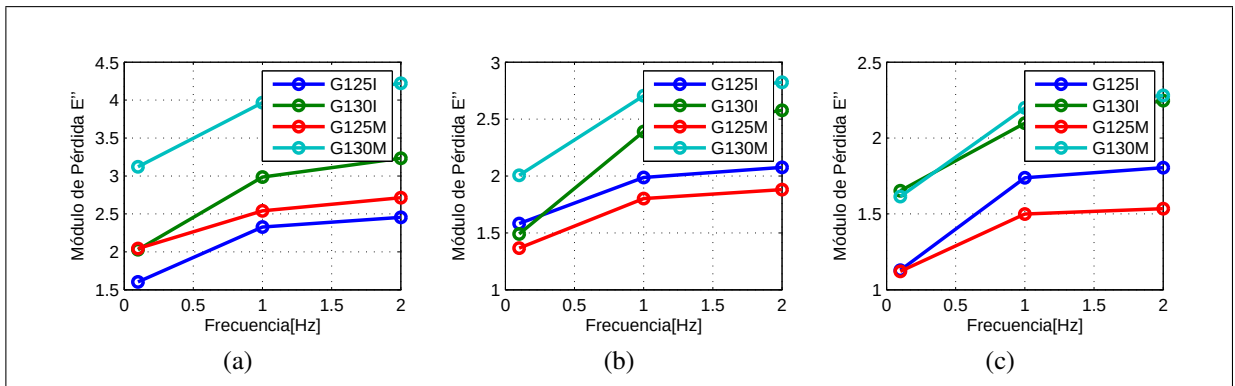


Figura C.35: E'' para G1 a 43kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

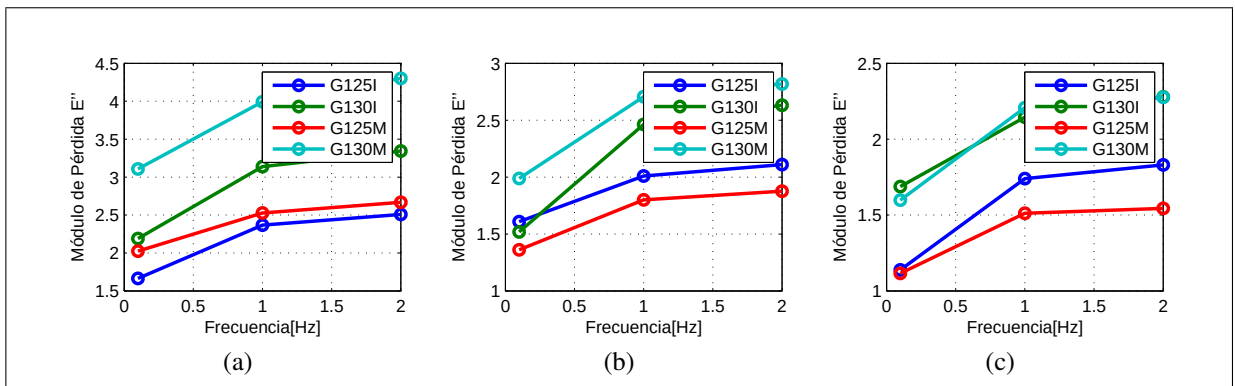


Figura C.36: E'' para G1 a 86kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

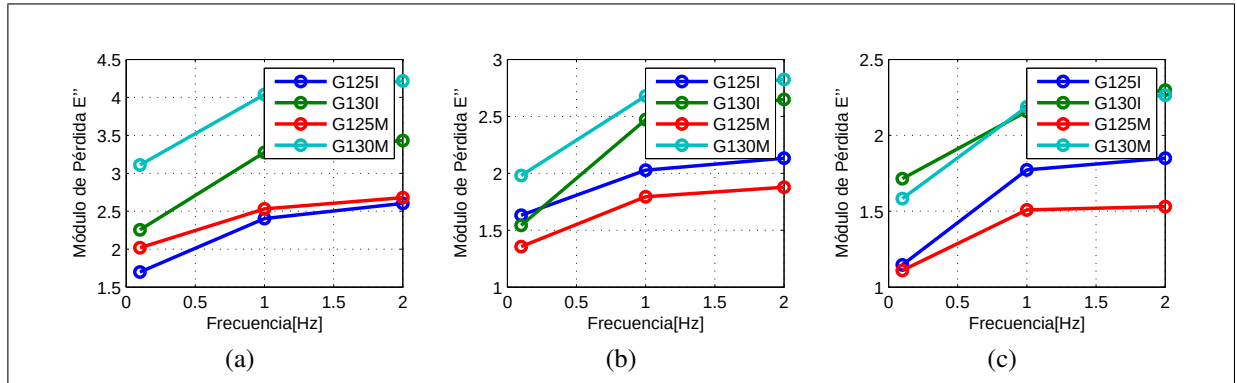


Figura C.37: E'' para G1 a 130kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

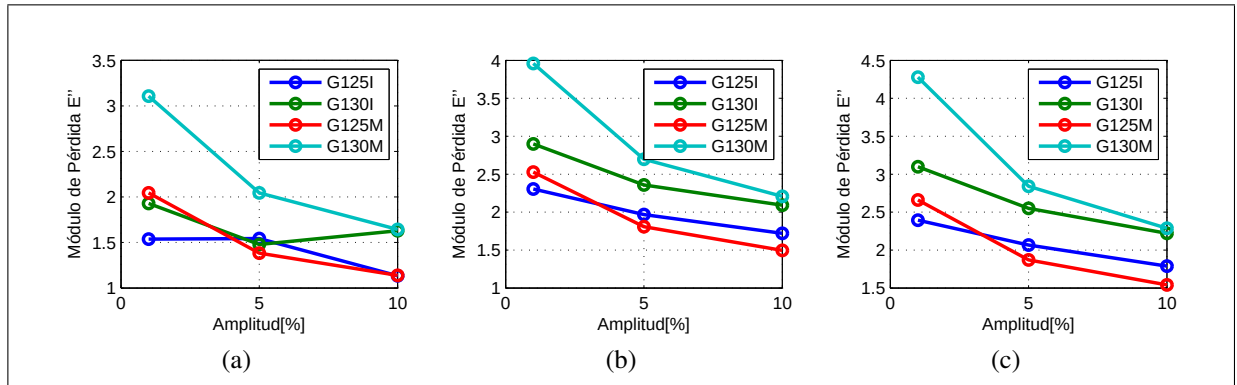


Figura C.38: E'' para G1 a 0kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

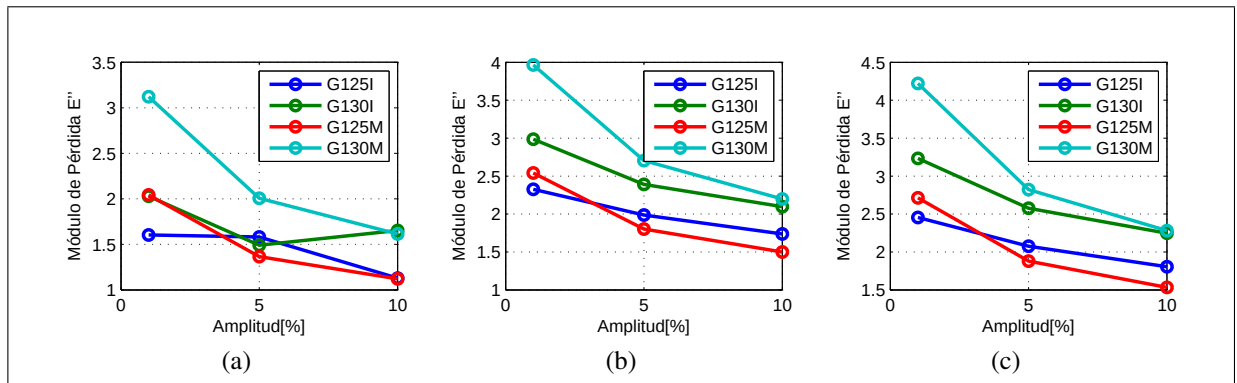


Figura C.39: E'' para G1 a 43kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

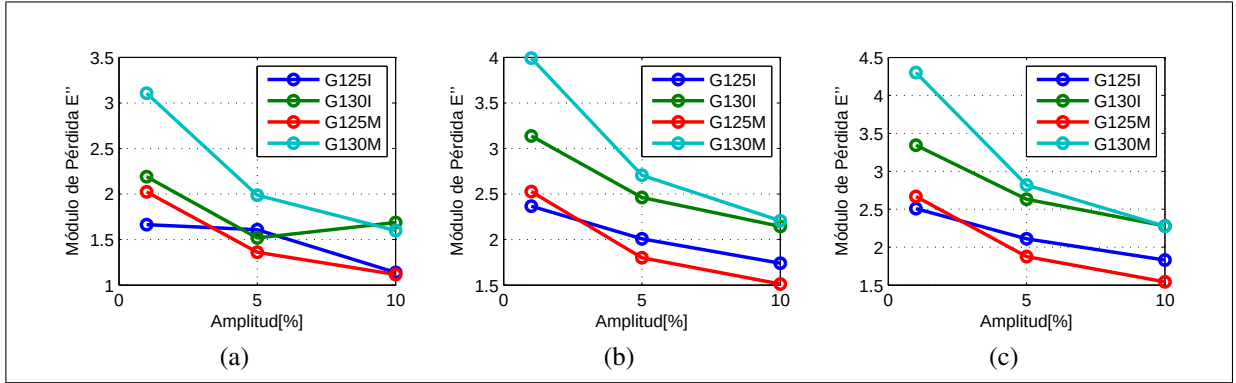


Figura C.40: E'' para G1 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.

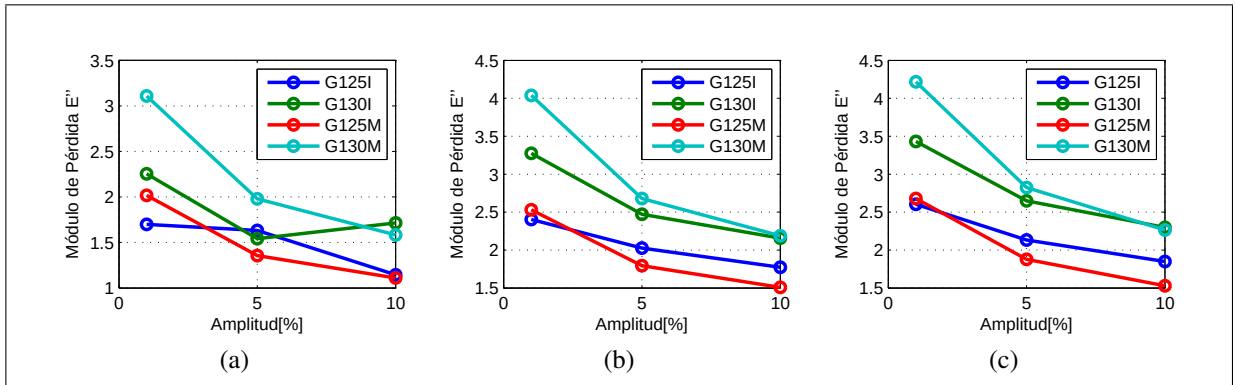


Figura C.41: E'' para G1 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.

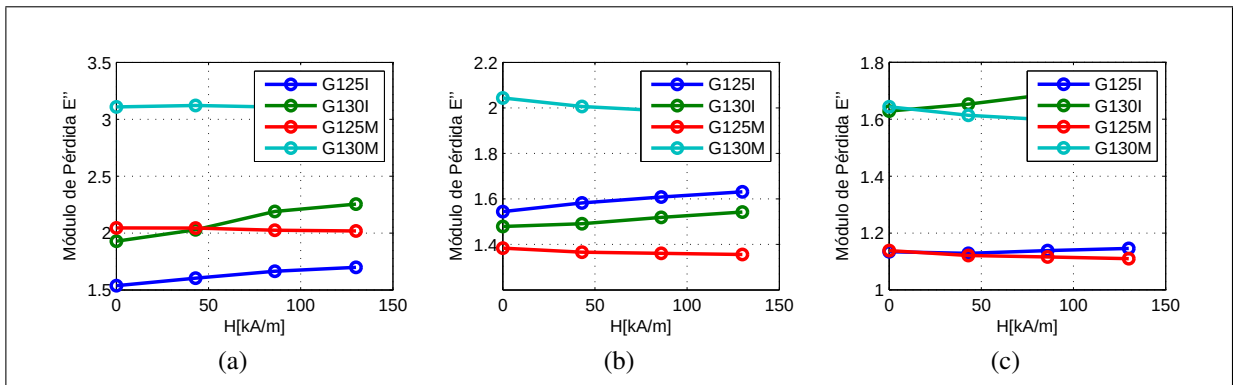


Figura C.42: E'' para G1 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

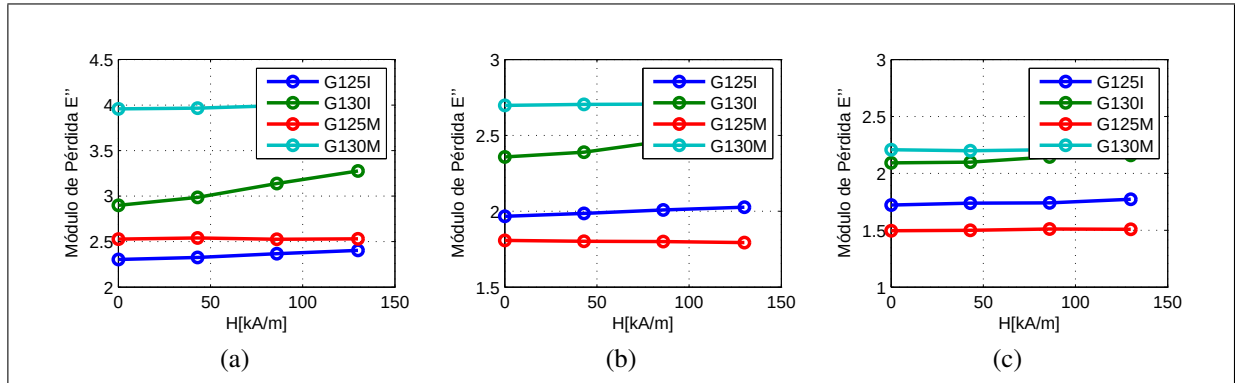


Figura C.43: E'' para G1 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

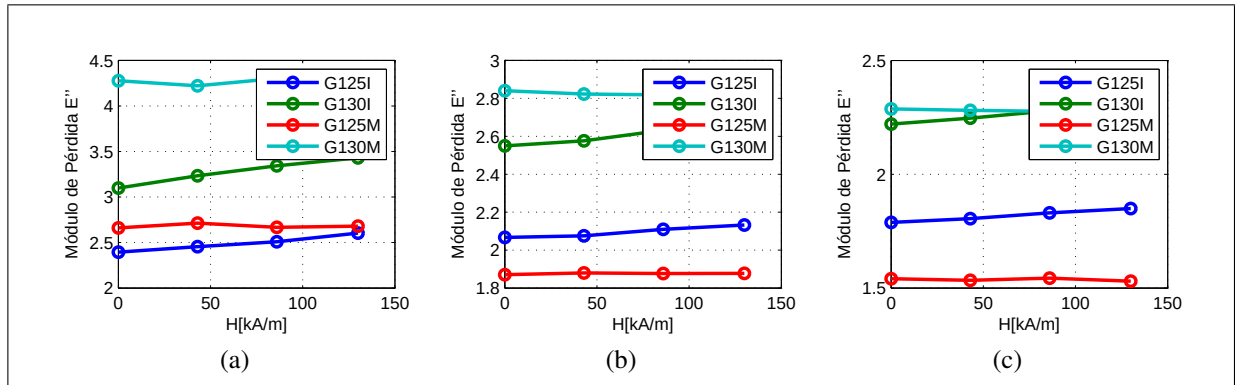


Figura C.44: E'' para G1 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

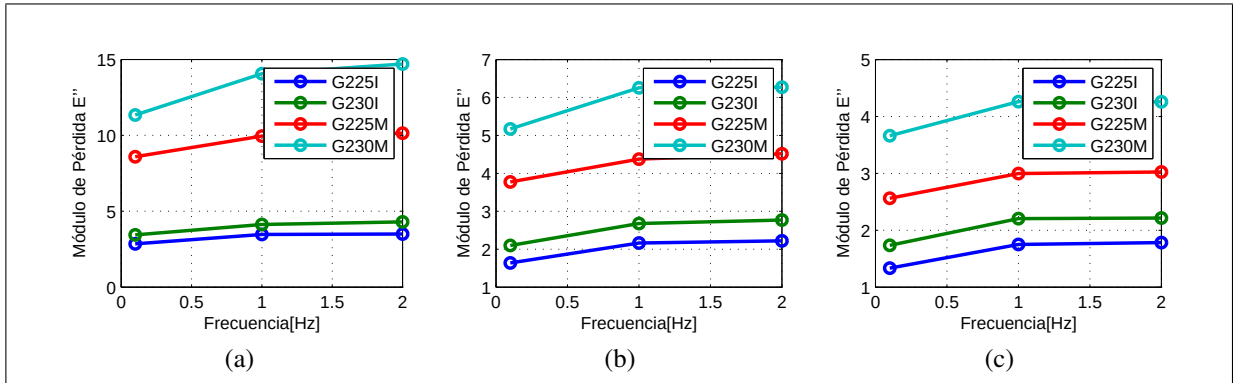


Figura C.45: E'' para G2 a 0kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

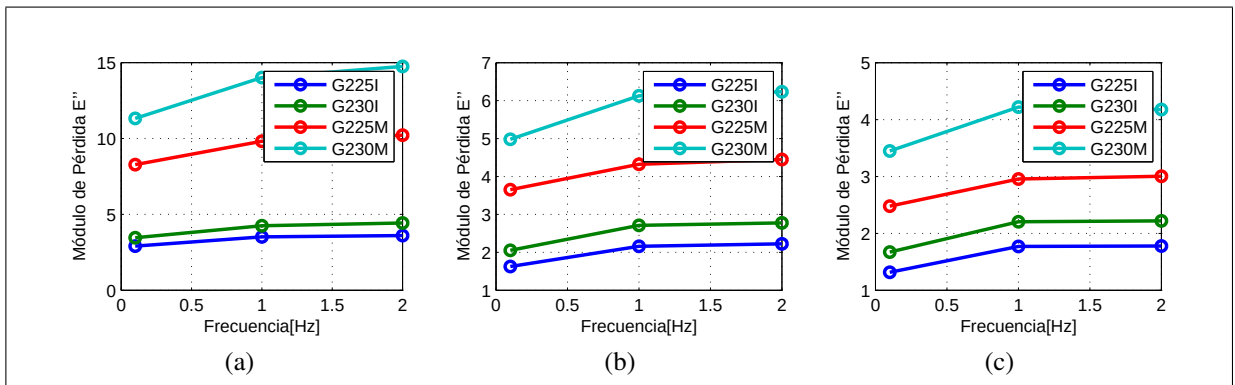


Figura C.46: E'' para G2 a 43kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

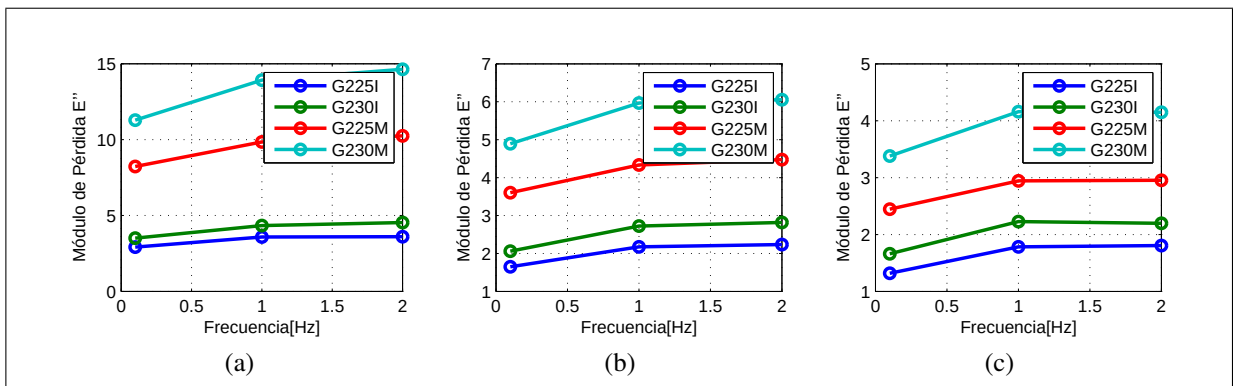


Figura C.47: E'' para G2 a 86kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

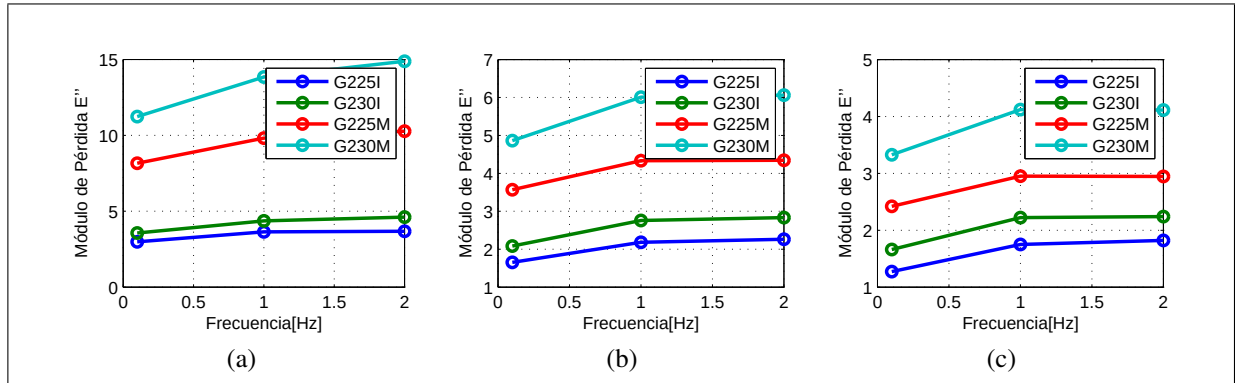


Figura C.48: E'' para G2 a 130kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

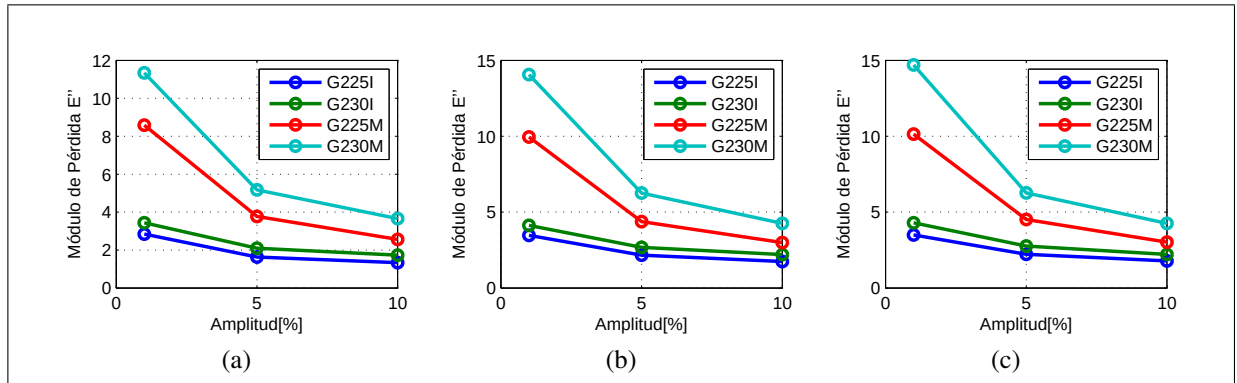


Figura C.49: E'' para G2 a 0kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

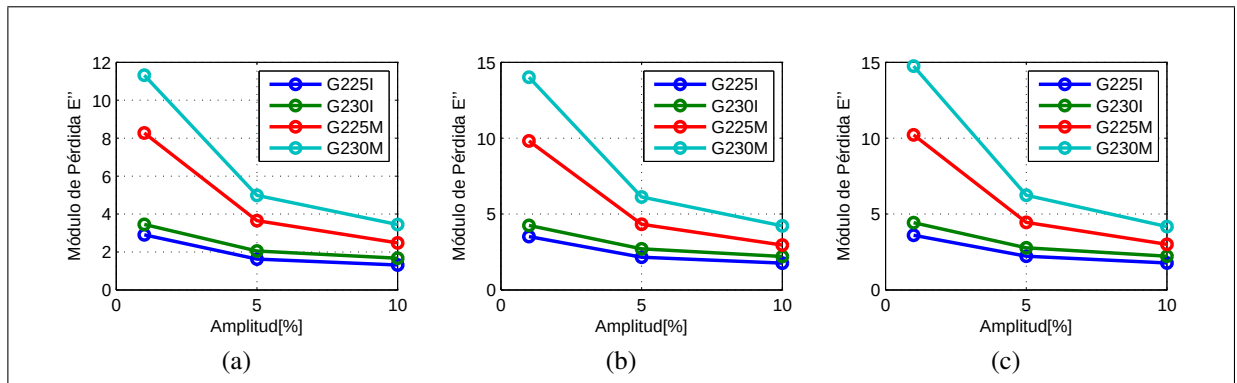


Figura C.50: E'' para G2 a 43kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

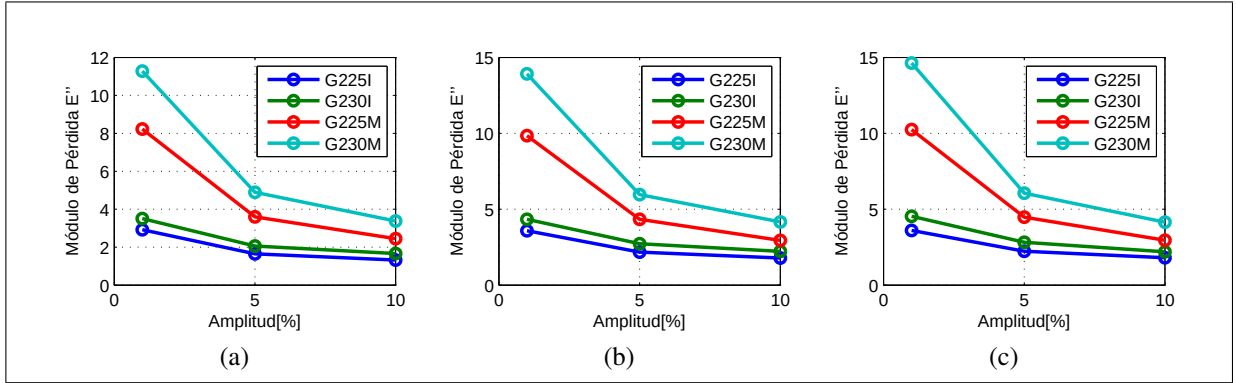


Figura C.51: E'' para G2 a 86kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

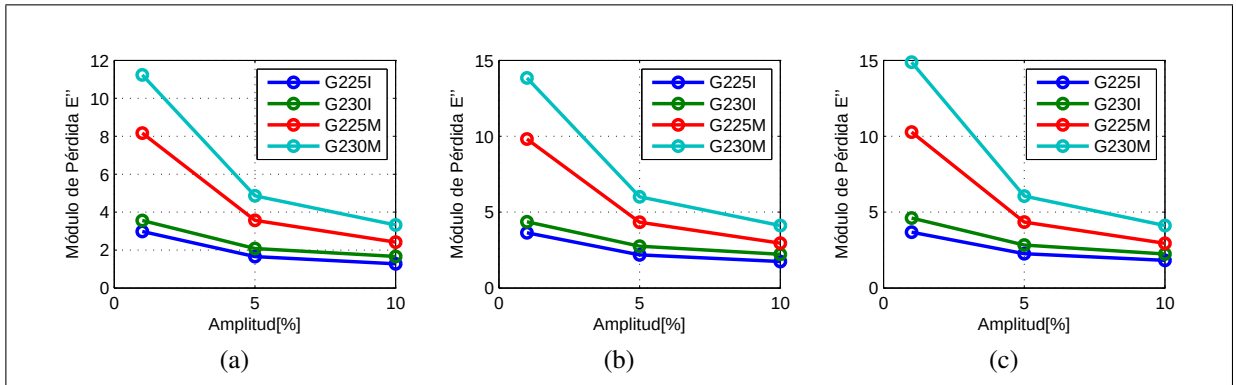


Figura C.52: E'' para G2 a 130kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

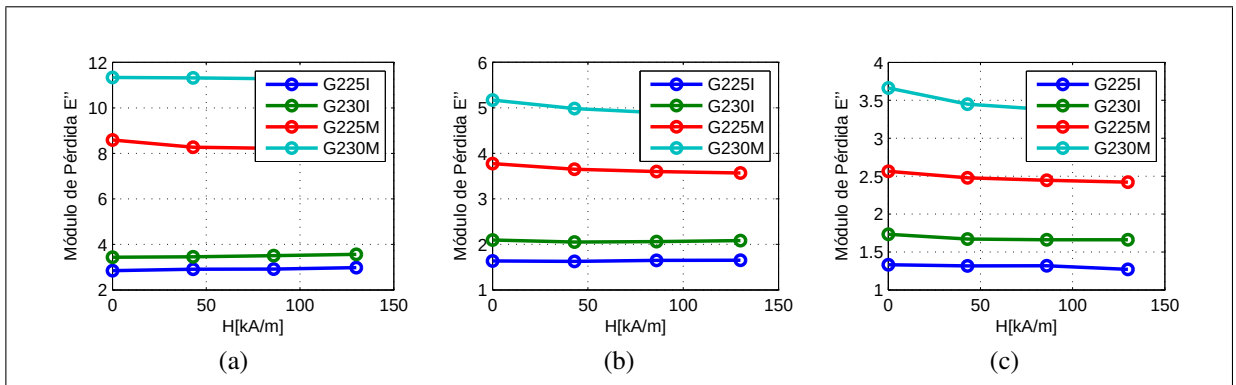


Figura C.53: E'' para G2 a 0.1Hz. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

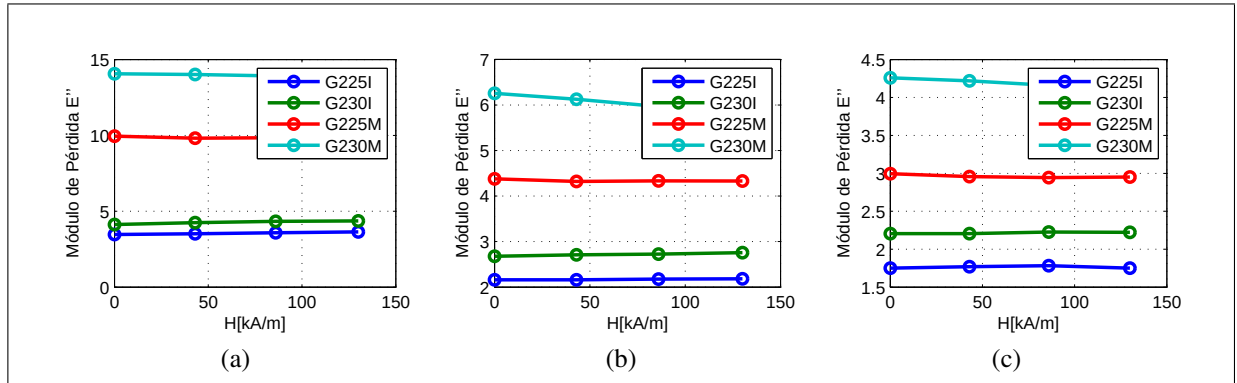


Figura C.54: E'' para G2 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

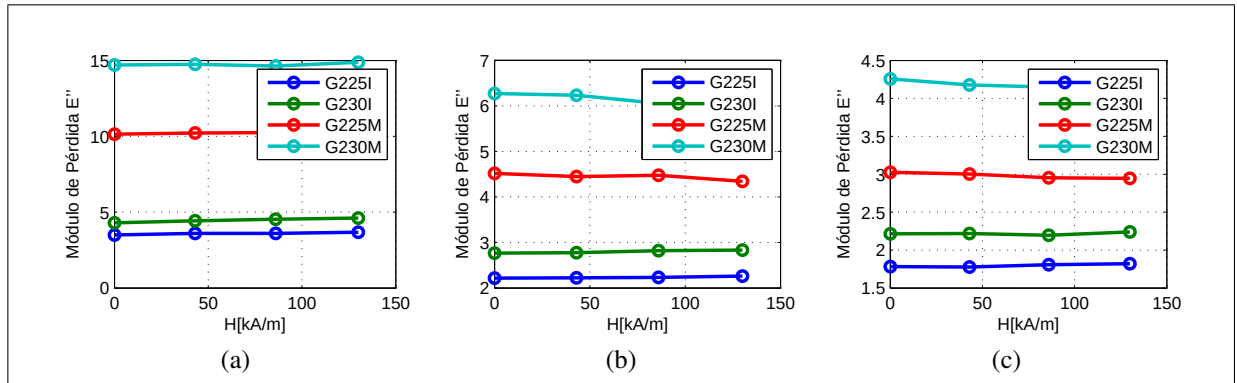


Figura C.55: E'' para G2 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

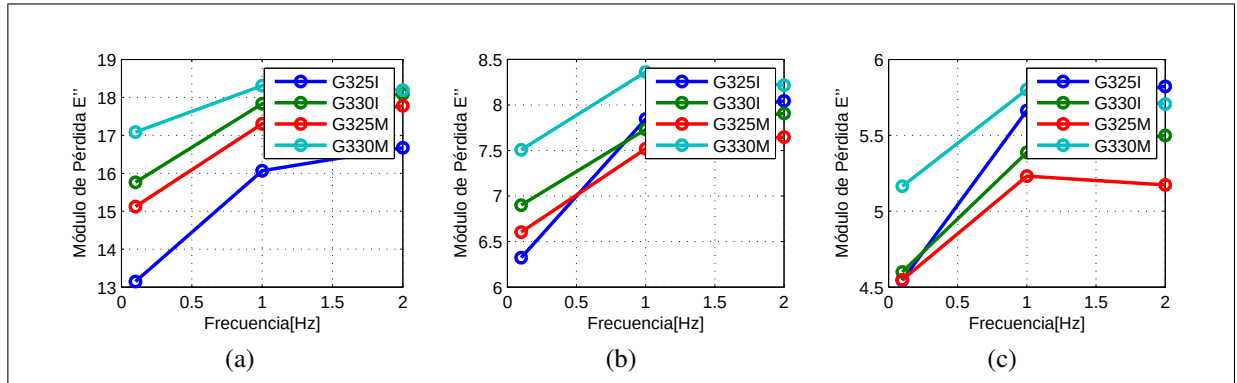


Figura C.56: E'' para G3 a 0kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

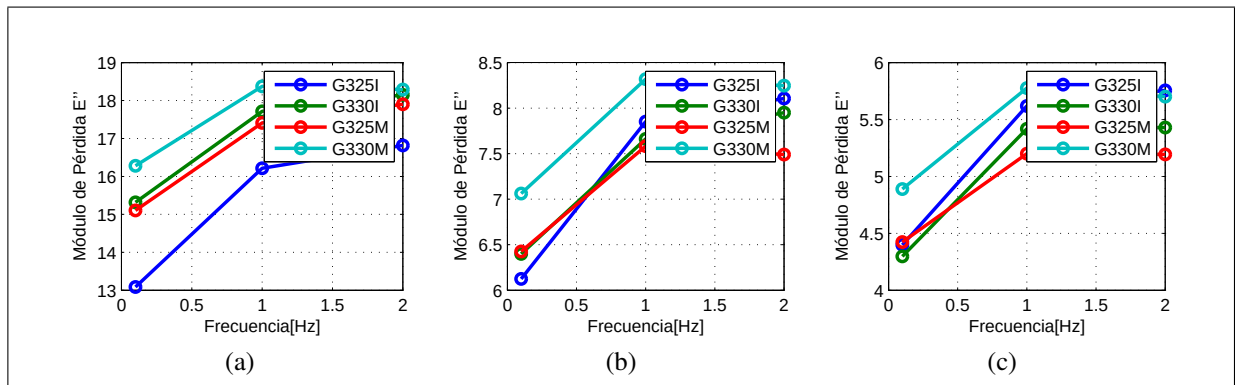


Figura C.57: E'' para G3 a 43kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

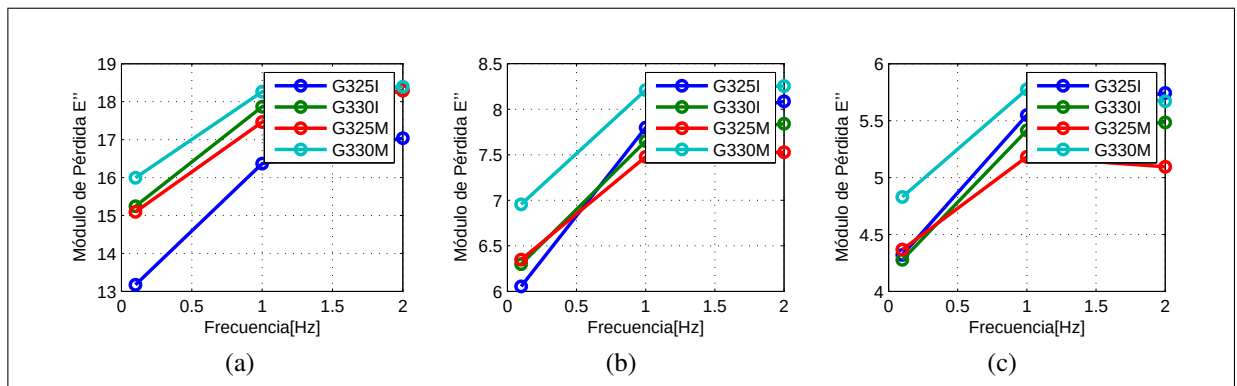


Figura C.58: E'' para G3 a 86kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

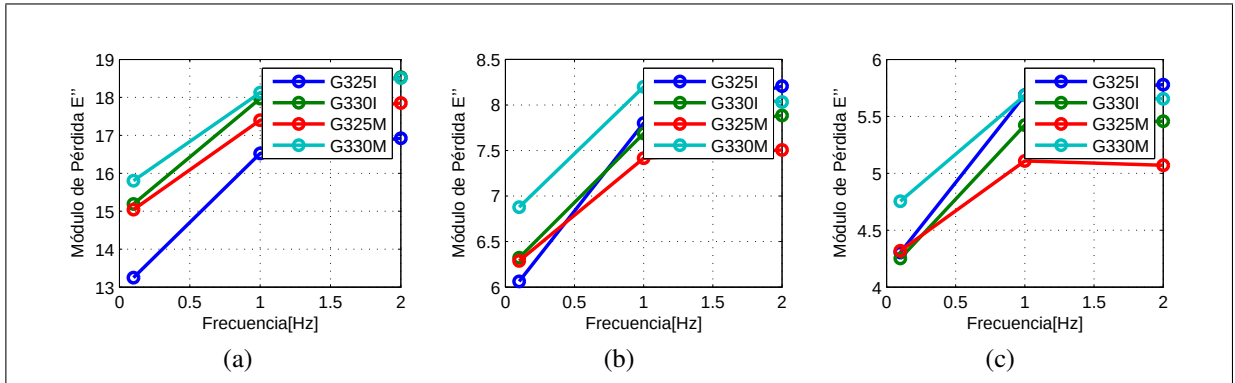


Figura C.59: E'' para G3 a 130kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

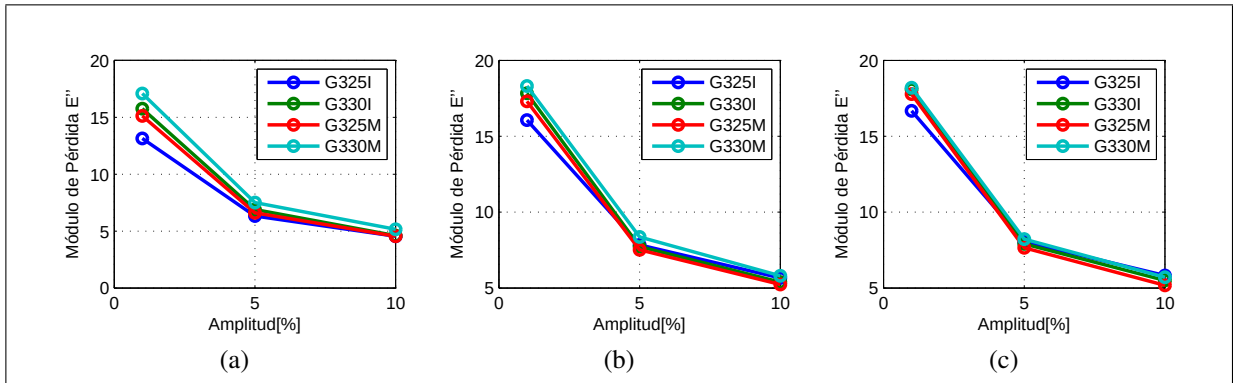


Figura C.60: E'' para G3 a 0kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

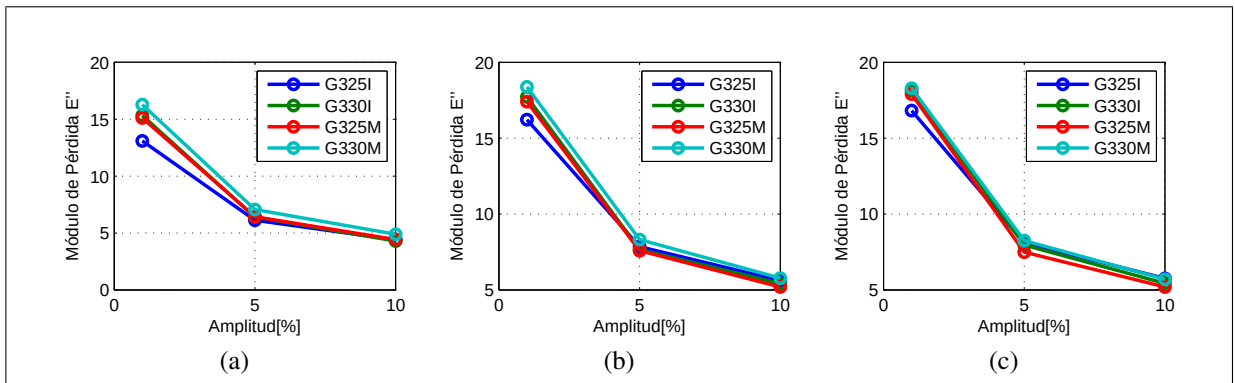


Figura C.61: E'' para G3 a 43kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

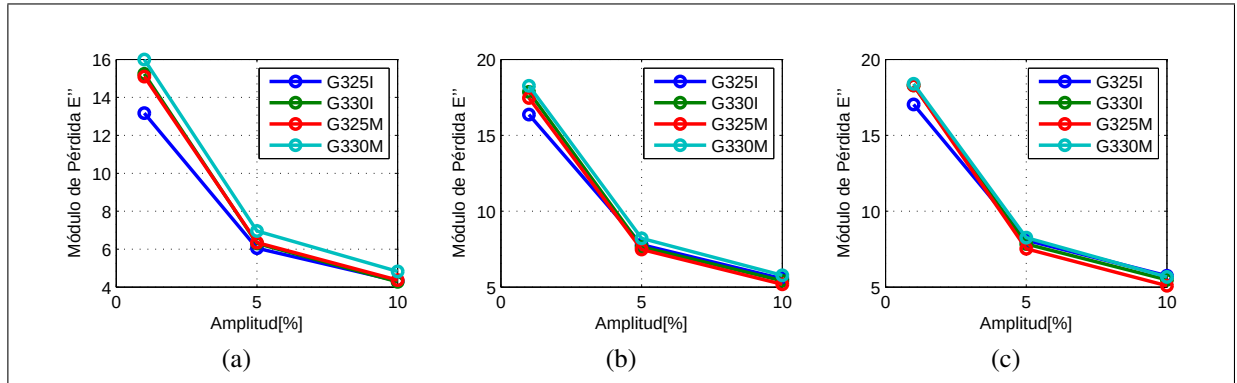


Figura C.62: E'' para G3 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.

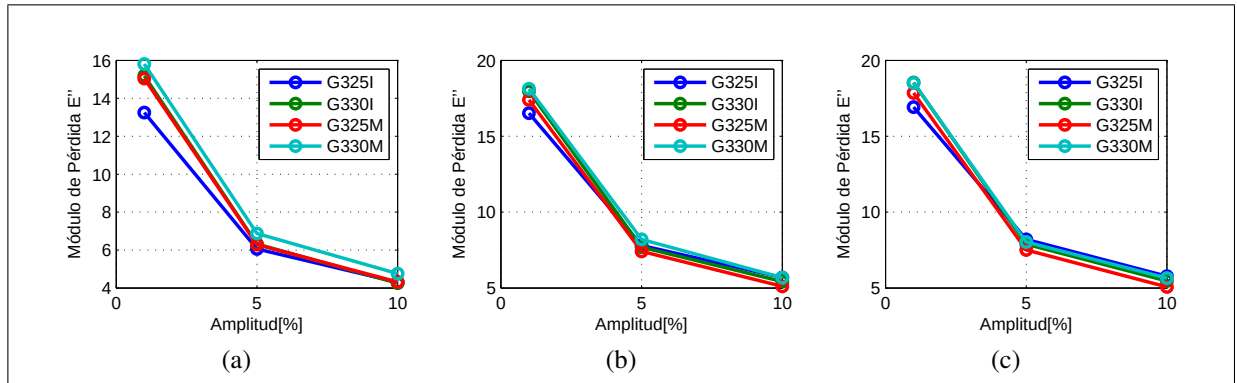


Figura C.63: E'' para G3 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.

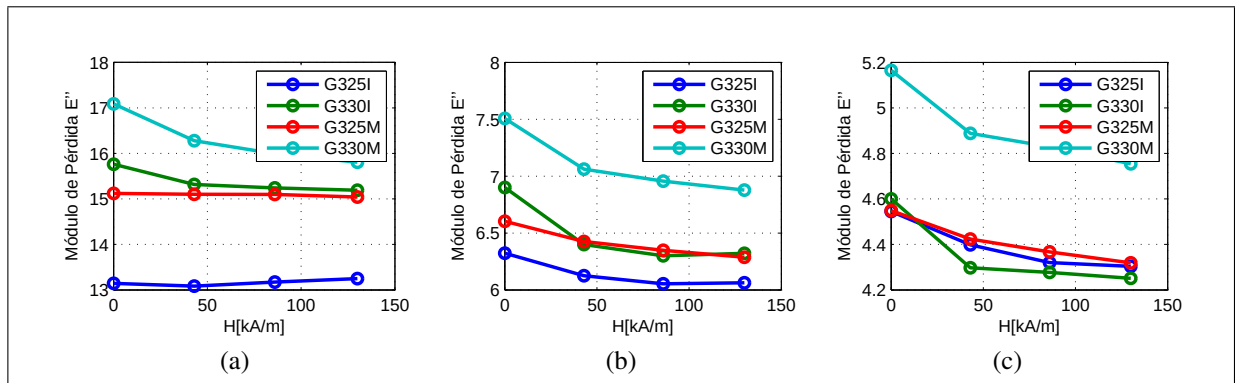


Figura C.64: E'' para G3 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

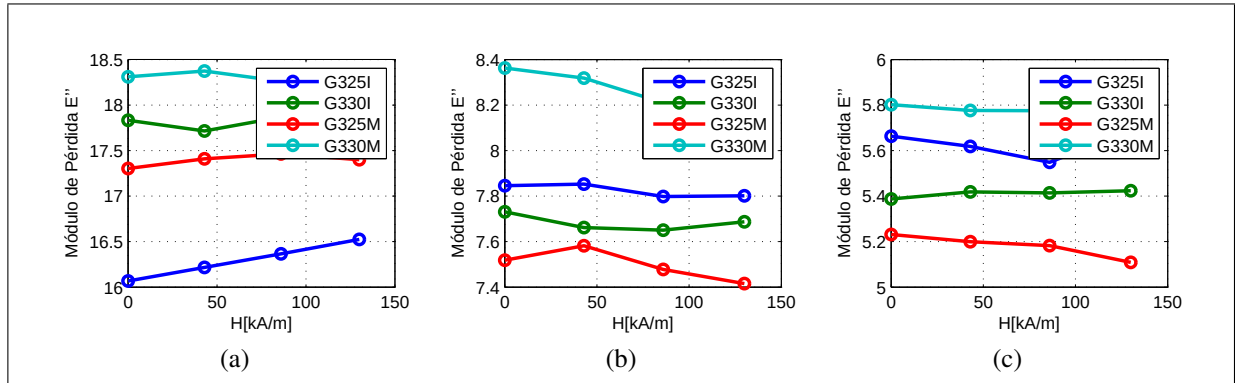


Figura C.65: E'' para G3 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

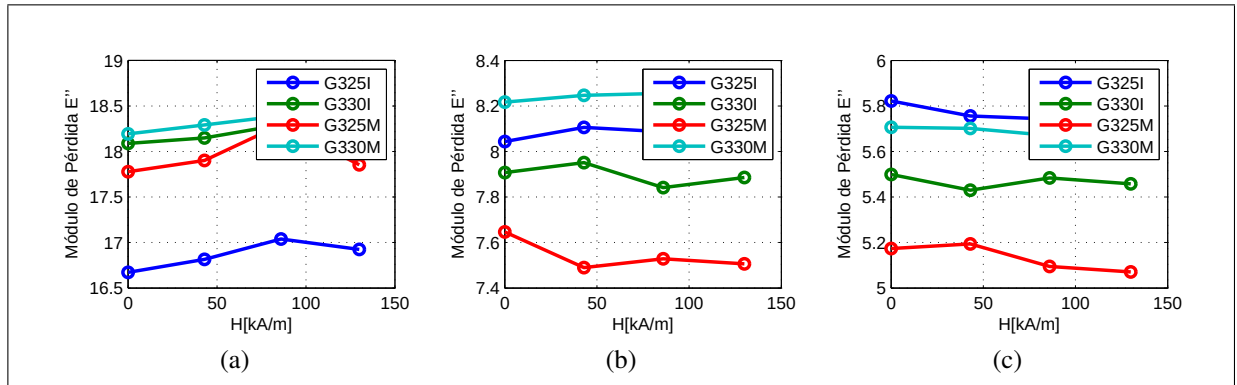


Figura C.66: E'' para G3 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

C.3. Módulo de pérdida η

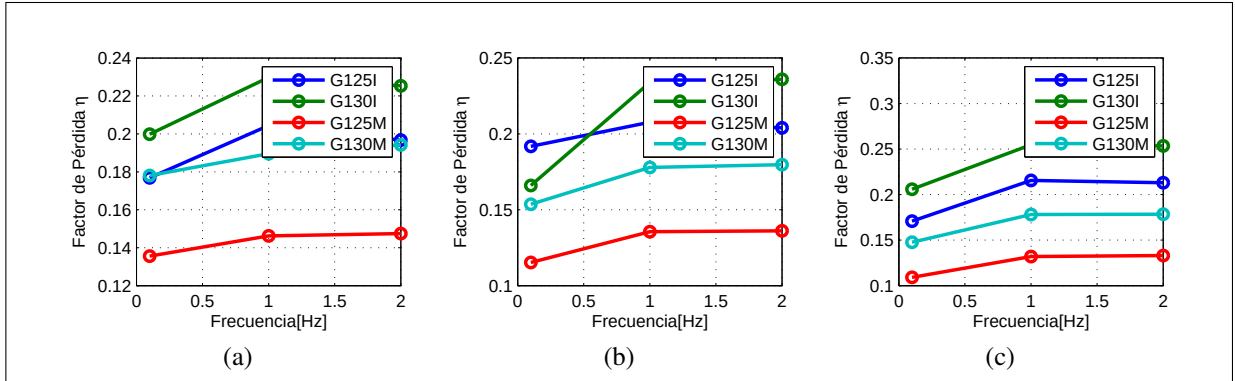


Figura C.67: η para G1 a 0kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

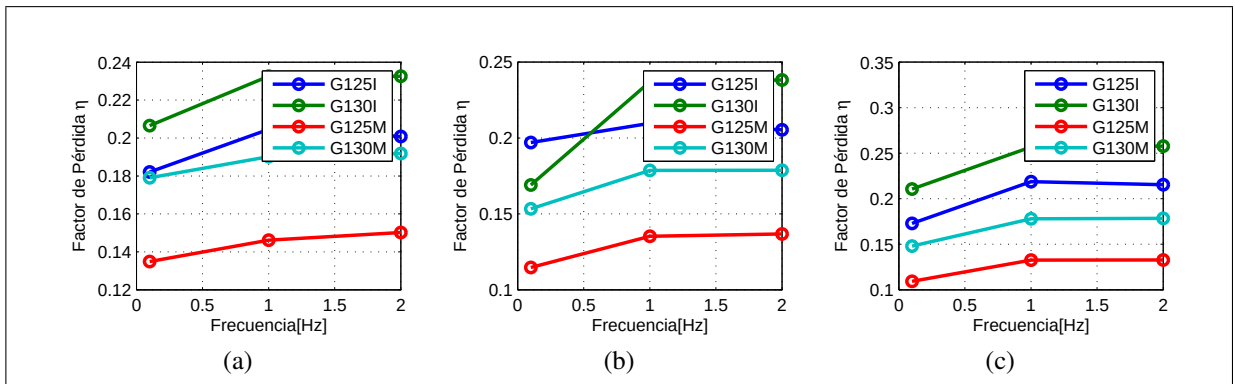


Figura C.68: η para G1 a 43kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

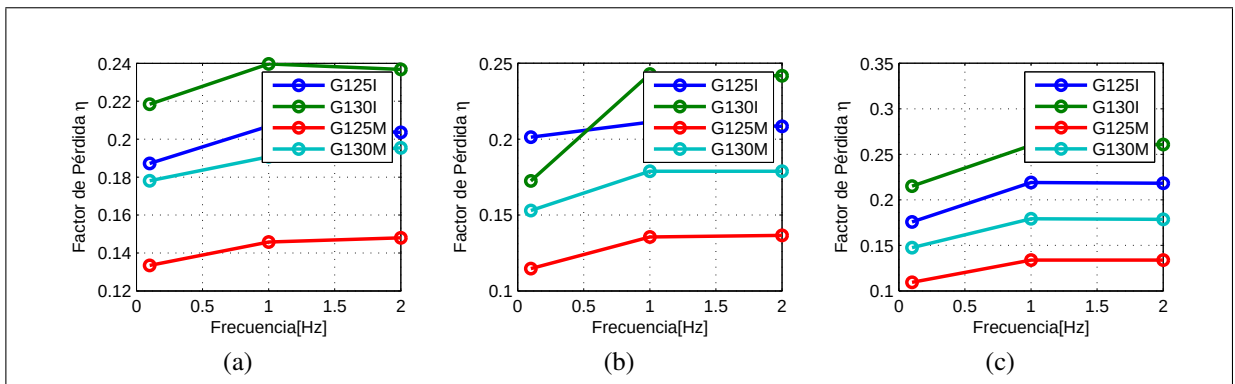


Figura C.69: η para G1 a 86kA/m. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

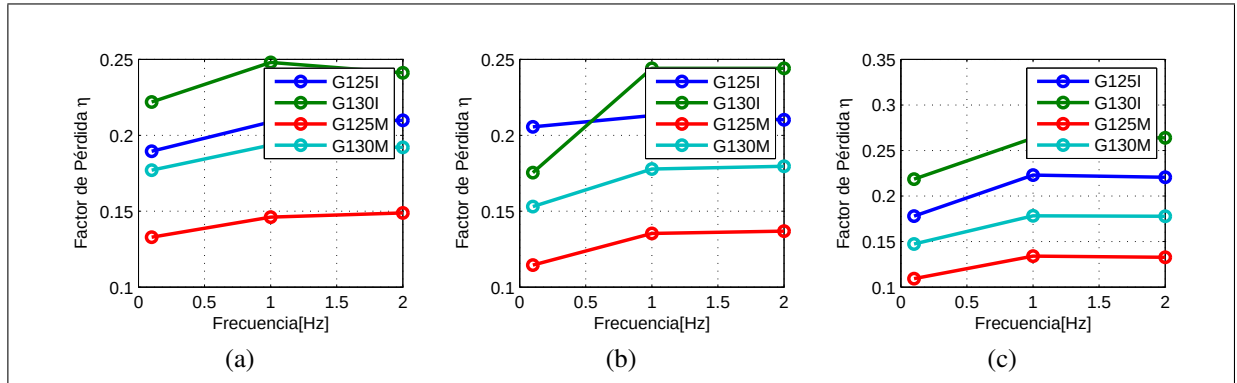


Figura C.70: η para G1 a 130kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

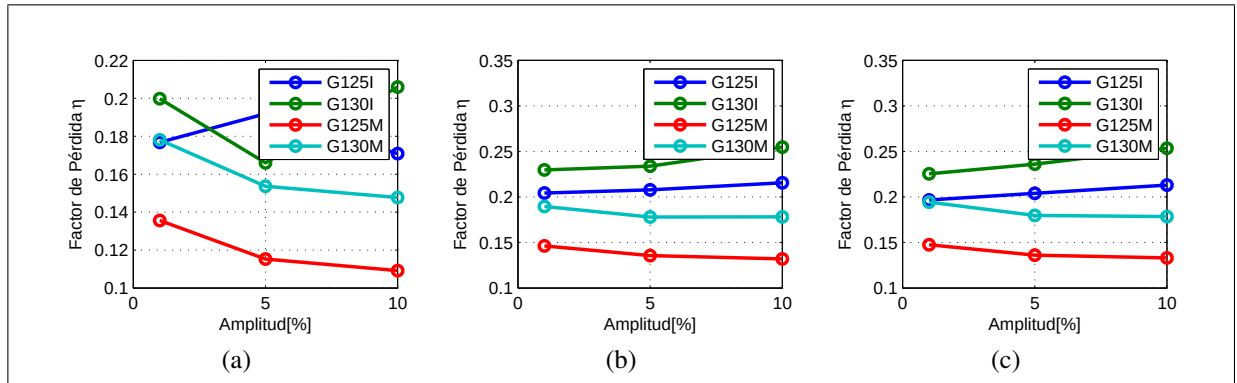


Figura C.71: η para G1 a 0kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

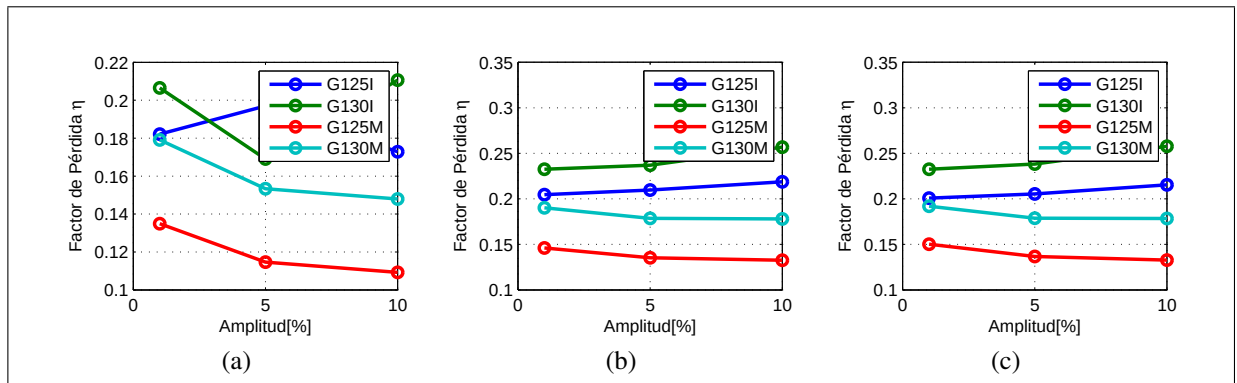


Figura C.72: η para G1 a 43kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

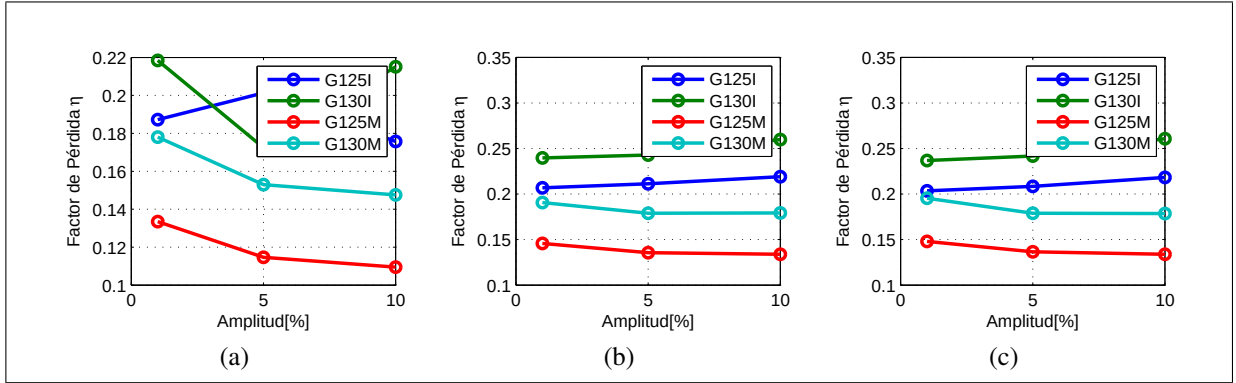


Figura C.73: η para G1 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.

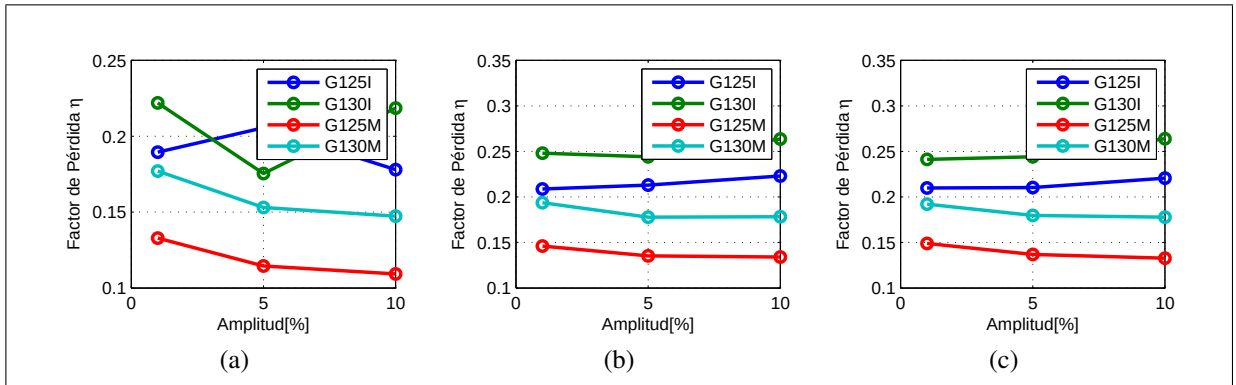


Figura C.74: η para G1 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.

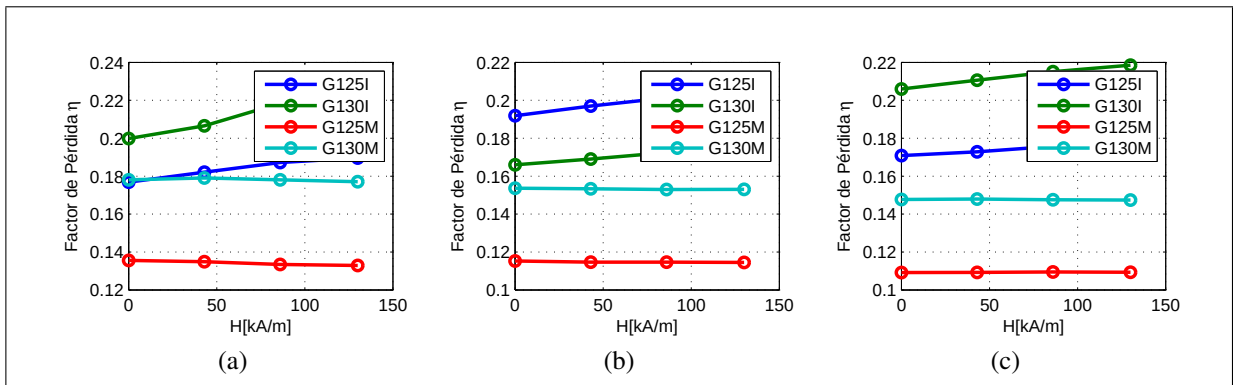


Figura C.75: η para G1 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

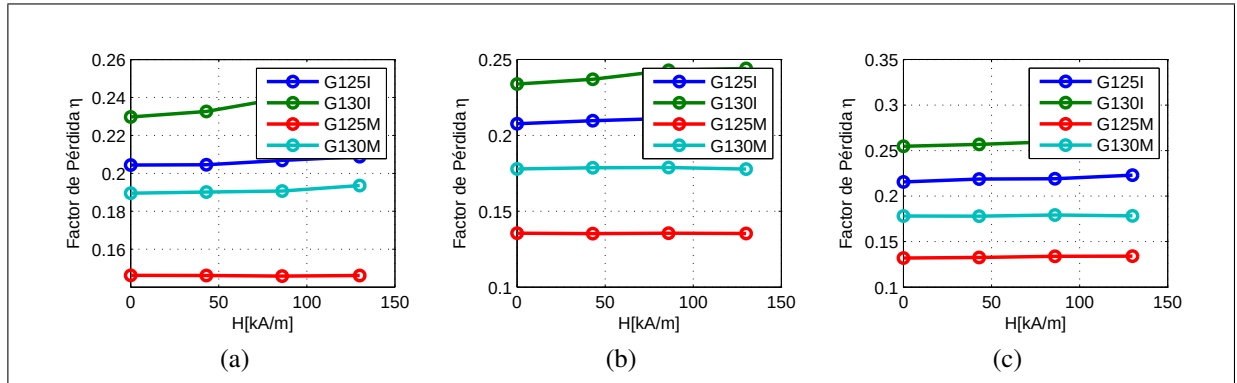


Figura C.76: η para G1 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

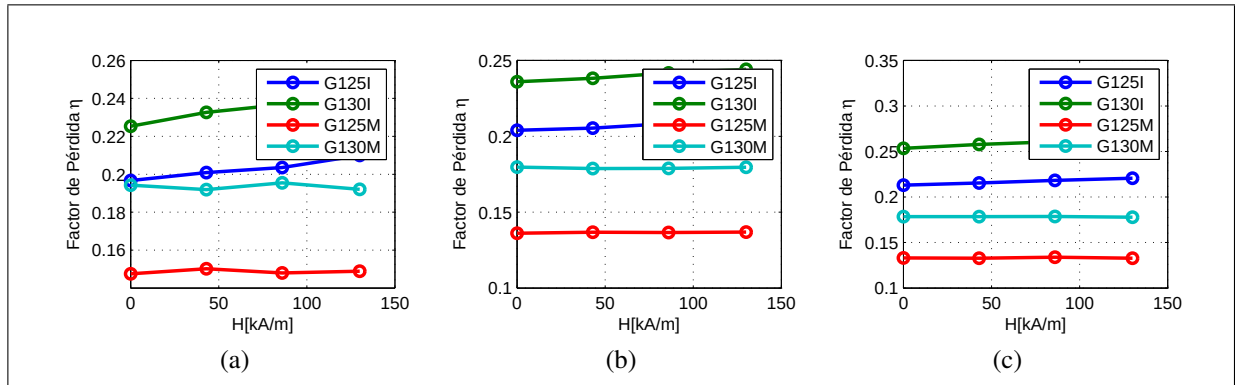


Figura C.77: η para G1 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

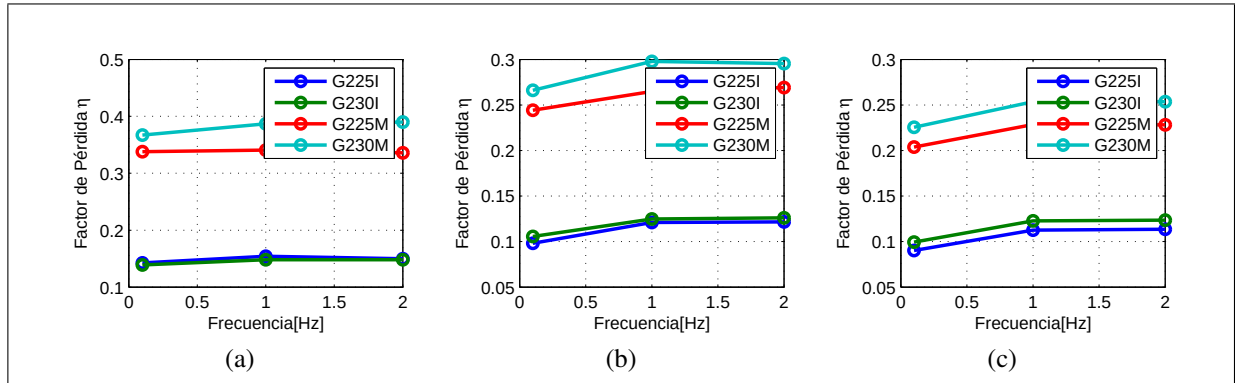


Figura C.78: η para G2 a 0kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

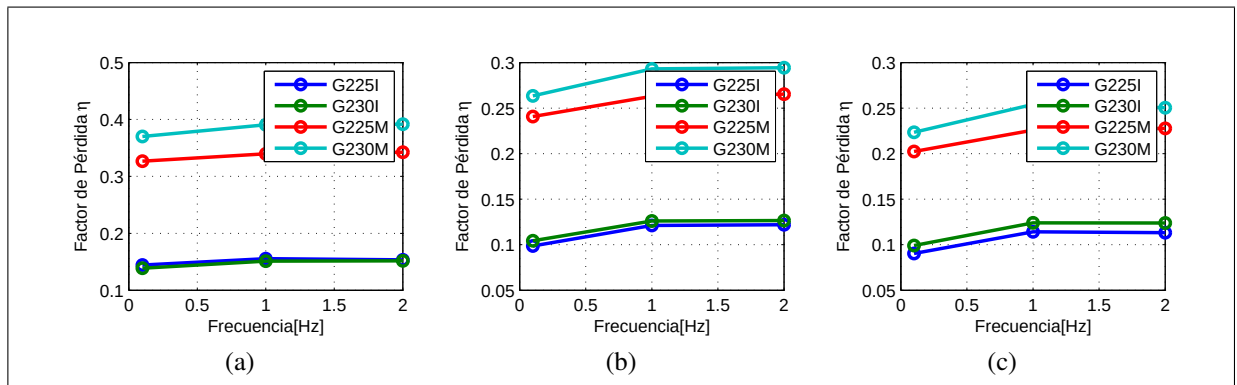


Figura C.79: η para G2 a 43kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

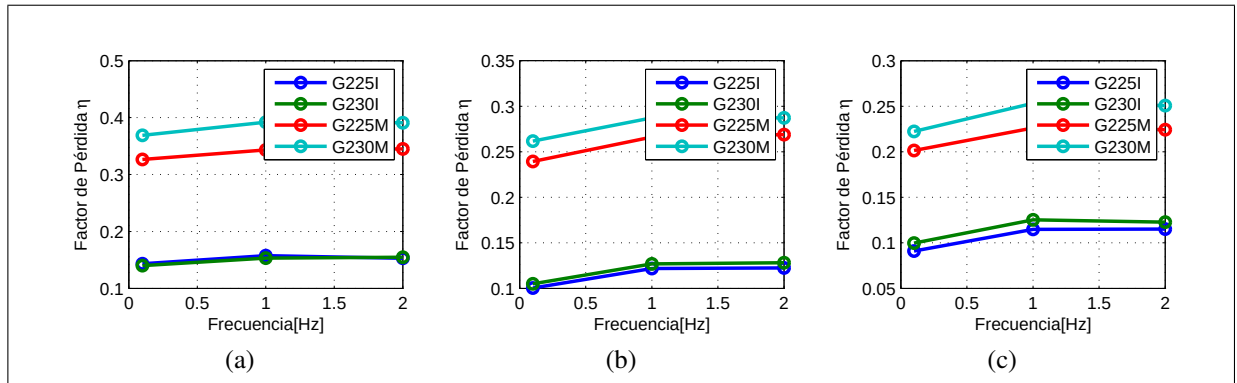


Figura C.80: η para G2 a 86kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

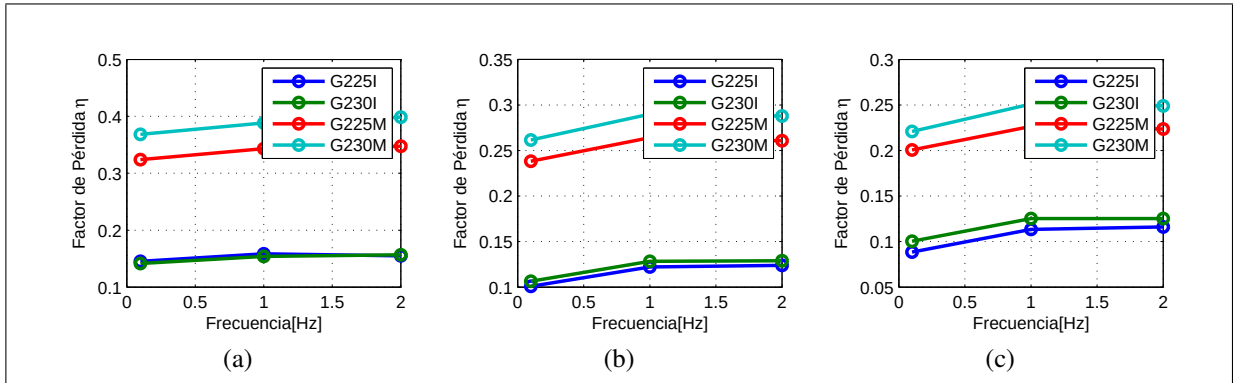


Figura C.81: η para G2 a 130kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

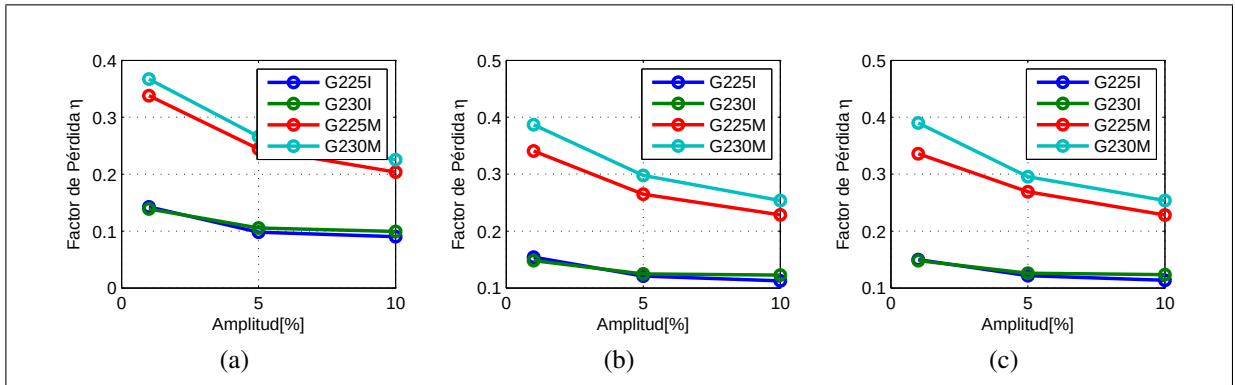


Figura C.82: η para G2 a 0kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

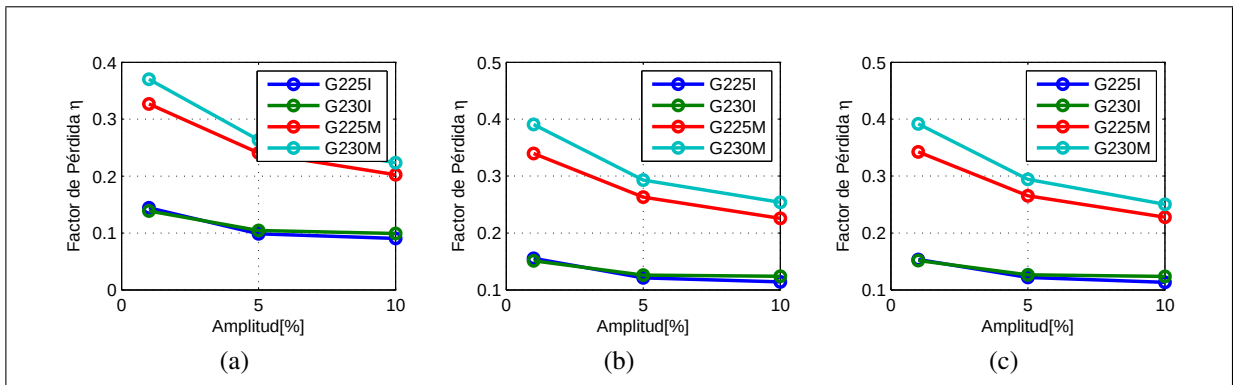


Figura C.83: η para G2 a 43kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

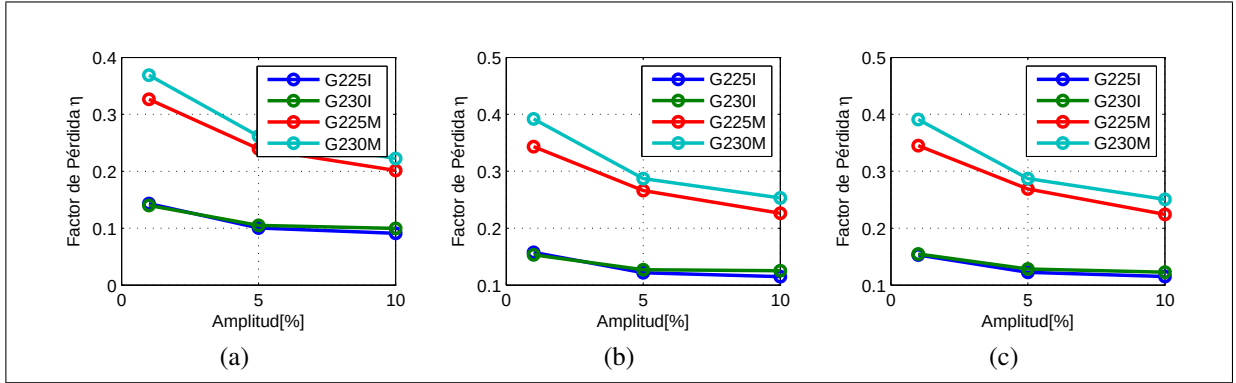


Figura C.84: η para G2 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.

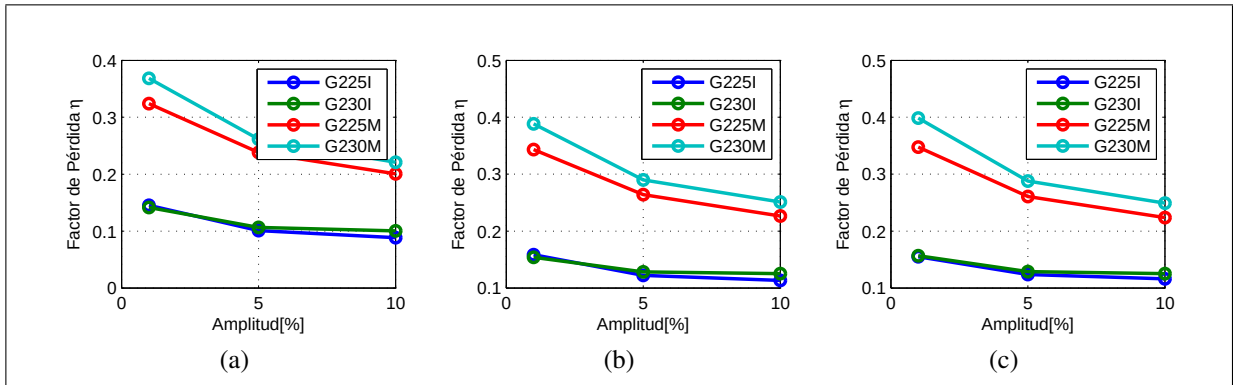


Figura C.85: η para G2 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.

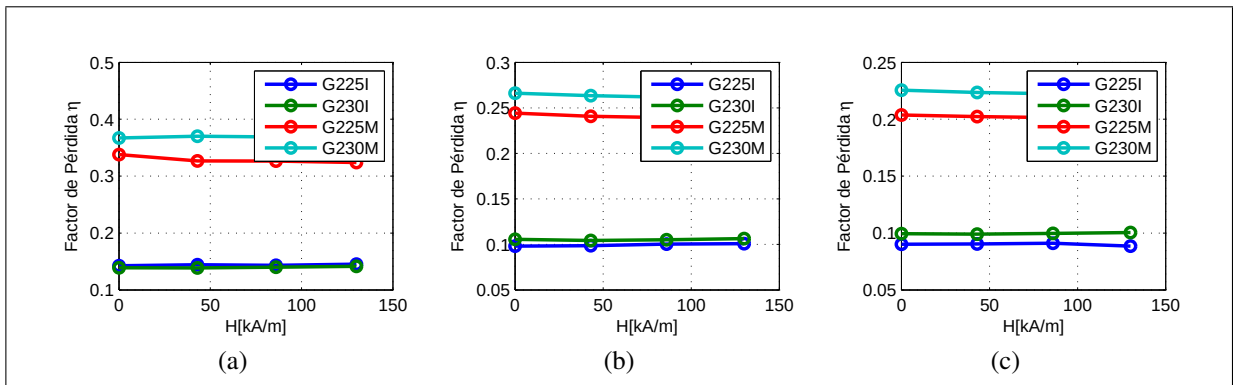


Figura C.86: η para G2 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

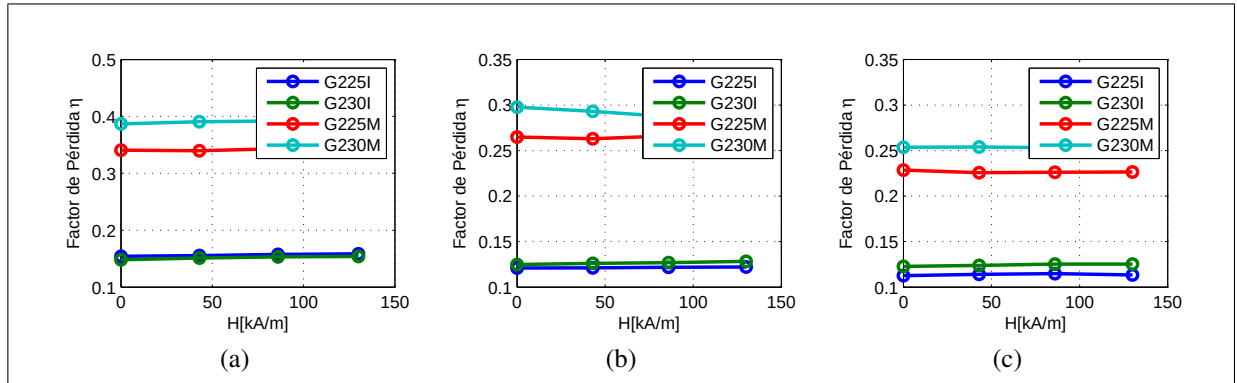


Figura C.87: η para G2 a 1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

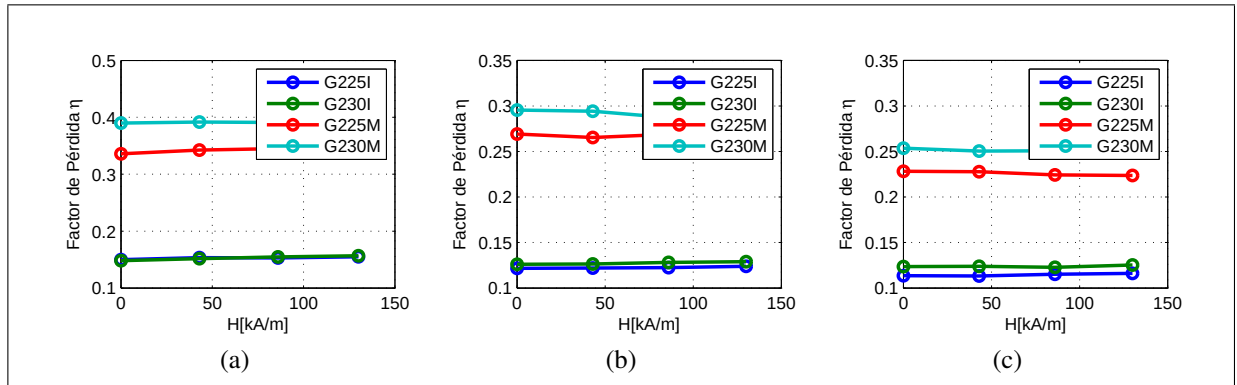


Figura C.88: η para G2 a 2Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

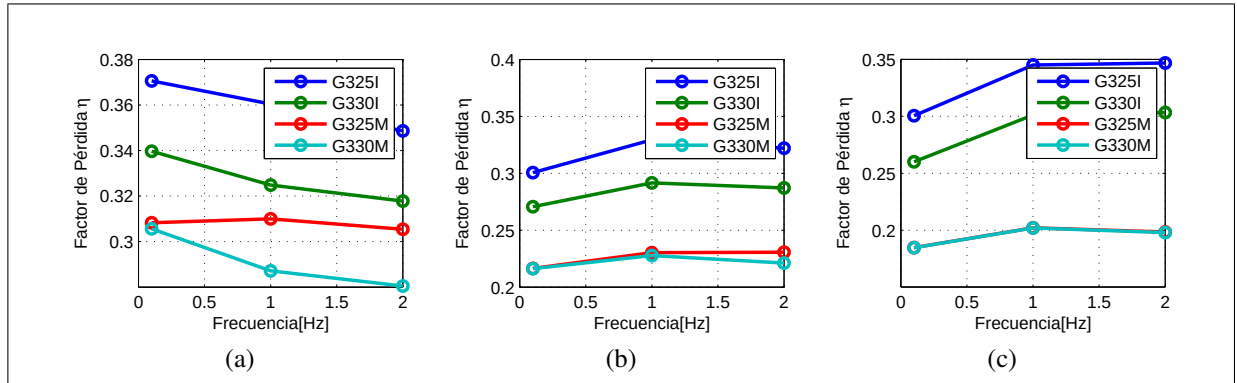


Figura C.89: η para G3 a 0kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

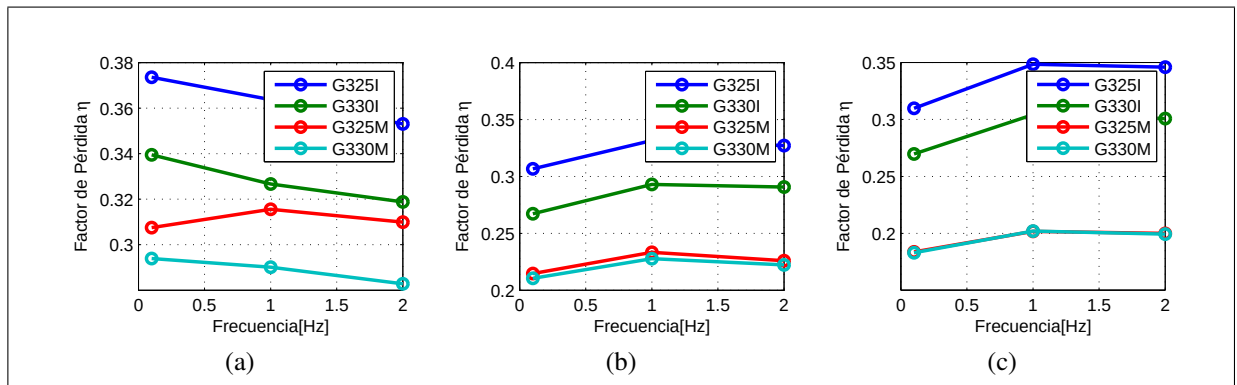


Figura C.90: η para G3 a 43kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

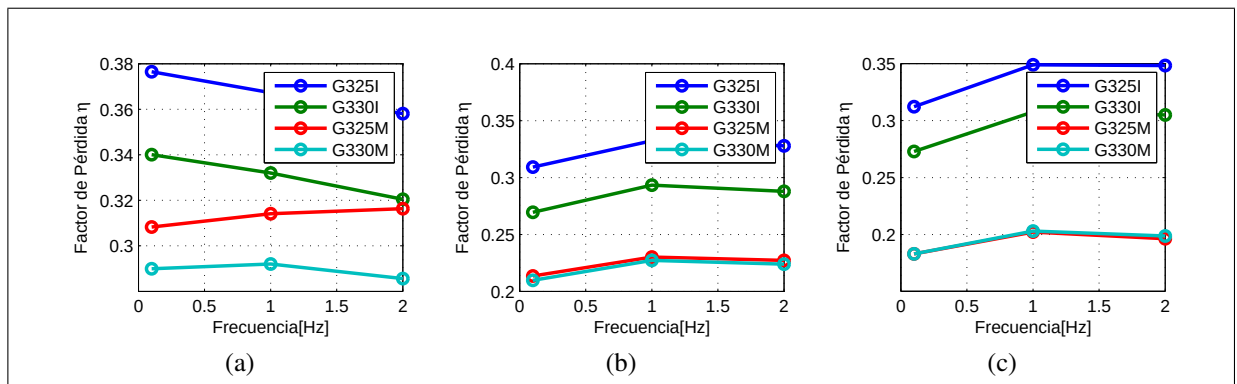


Figura C.91: η para G3 a 86kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

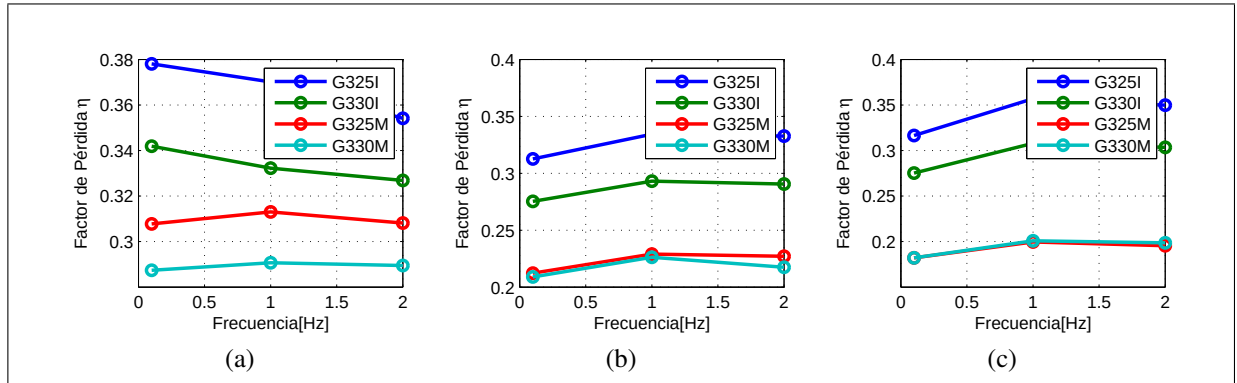


Figura C.92: η para G3 a 130kA/m. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

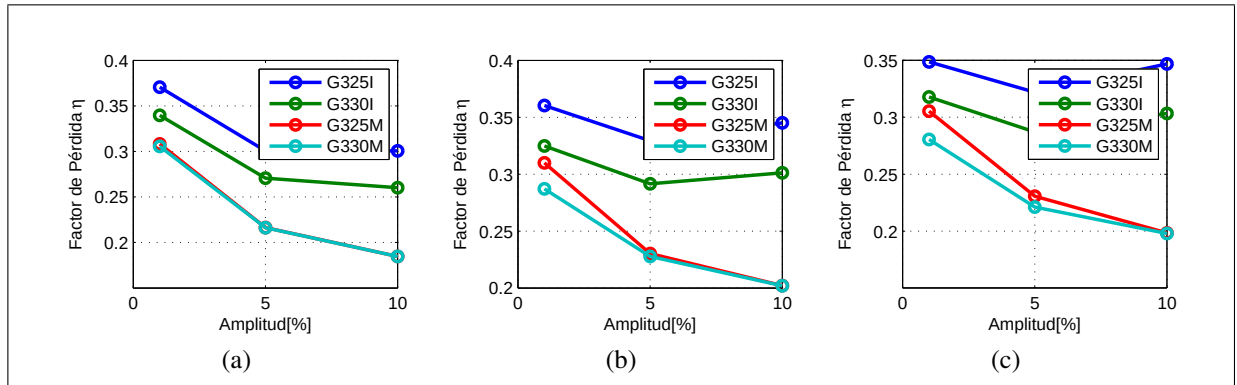


Figura C.93: η para G3 a 0kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

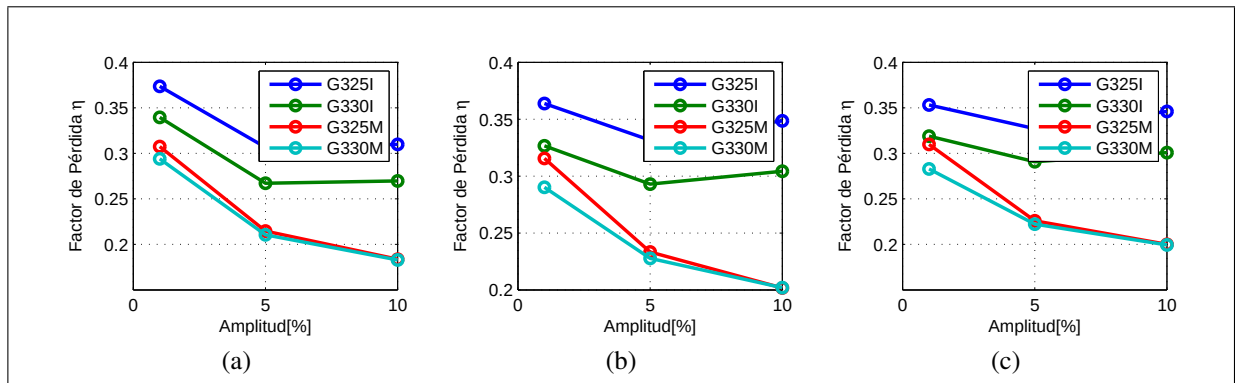


Figura C.94: η para G3 a 43kA/m. a) 0.1Hz; b) 1Hz; c) 2Hz.

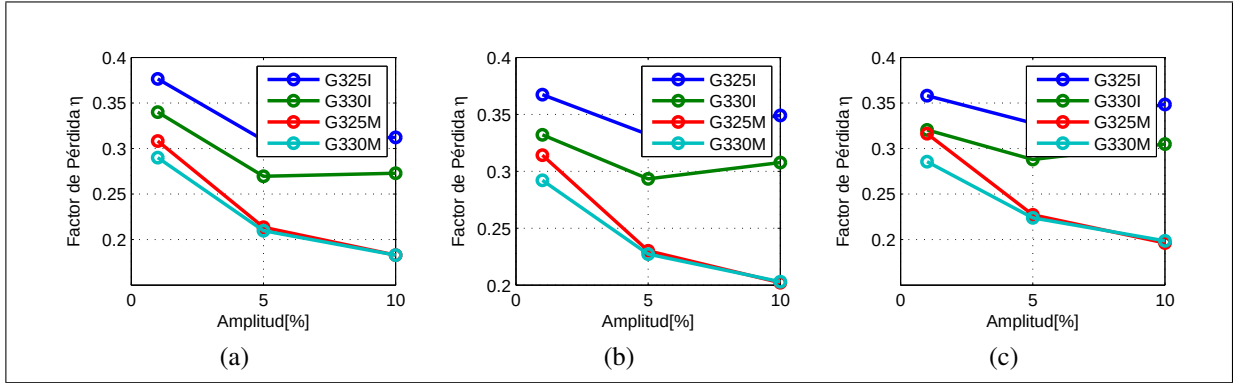


Figura C.95: η para G3 a 86kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.

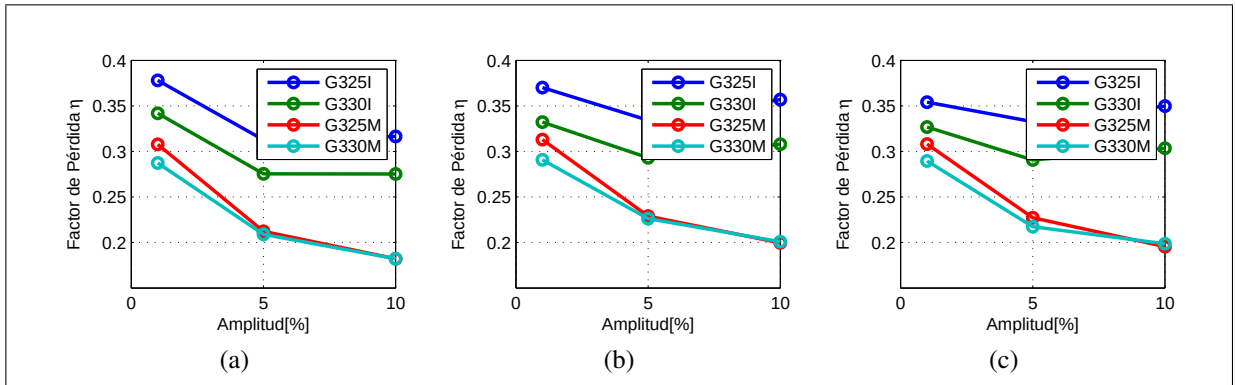


Figura C.96: η para G3 a 130kA/m. a)0.1Hz; b)1Hz; c)2Hz.

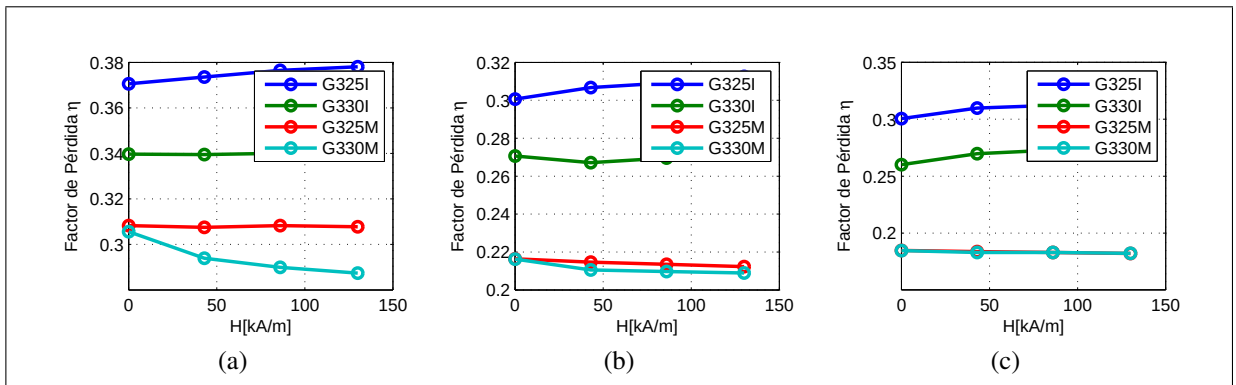


Figura C.97: η para G3 a 0.1Hz. a)1 %; b)5 %; c)10 %.

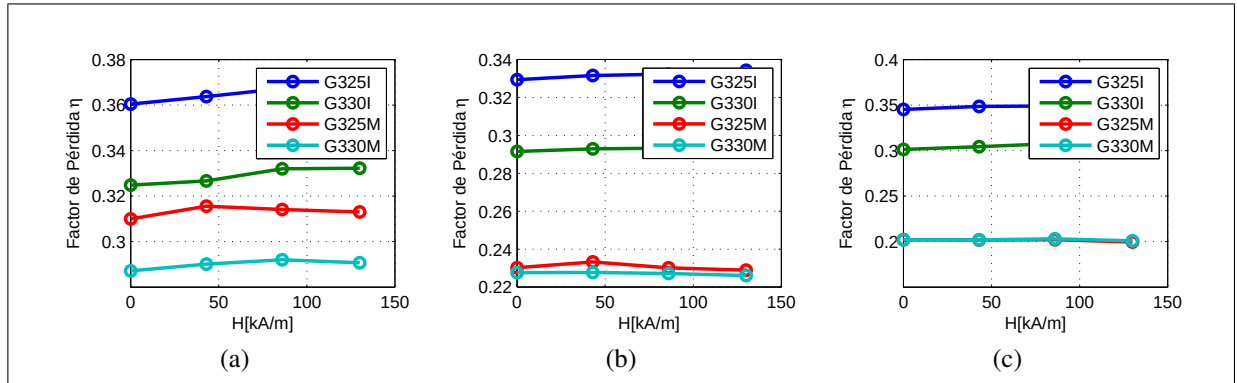


Figura C.98: η para G3 a 1Hz. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.

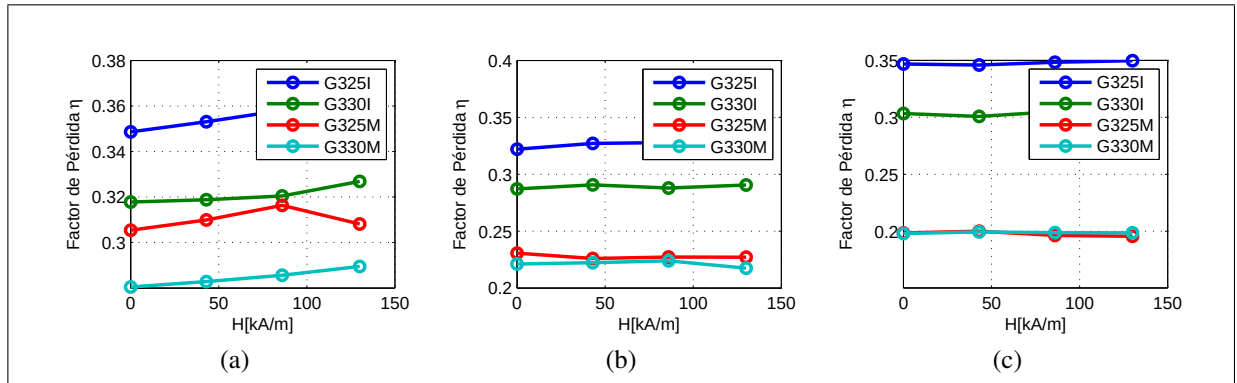


Figura C.99: η para G3 a 2Hz. a) 1 %; b) 5 %; c) 10 %.