

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"MÉTODOS DE ENSAYOS PARA
CARACTERIZACIÓN DE ADHESIVOS
HIPERELÁSTICOS, DEFINICIÓN DE LOS PLANES
DE ENSAYO Y DISEÑO DE UTILLAJES"

TRABAJO FIN DE GRADO

Diciembre -2020

AUTOR: Andrés Robles Navarro

DIRECTOR/ES: Óscar Cuadrado Sempere

Francisco Javier Simón Portillo

1.	INTRODUCCIÓN.....	17
1.1	EVOLUCIÓN:.....	17
1.2	CLASIFICACIONES DE ADHESIVOS:.....	18
1.2.1.	SEGÚN PROPIEDADES:.....	18
1.2.2.	SEGÚN EL CURADO:.....	19
1.2.2.1.	ADHESIVOS PREPOLIMERIZADOS:.....	19
1.2.2.2.	ADHESIVOS REACTIVOS:.....	19
1.2.3.	TABLA CLASIFICATORIA	20
1.3	CONCEPTOS BÁSICOS.....	21
1.3.1.	UNIÓN ADHESIVA:.....	21
1.3.2.	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO:.....	21
1.3.2.1.	FUERZAS DE UNIÓN:.....	21
1.3.2.2.	TIPOS DE ROTURAS:.....	23
1.3.3.	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA UNIÓN ADHESIVA	24
1.3.4.	TIPOS DE ESFUERZOS Y UNIONES	24
1.3.4.1.	ESFUERZOS	24
1.3.4.2.	UNIONES	25
1.4	APLICACIONES PARA UNIONES ADHESIVAS	27
1.4.1.	ATRACTIVO DEL PRODUCTO:.....	27
1.4.1.1.	VENTAJAS:.....	27
1.4.1.2.	DESVENTAJAS:.....	28
1.4.2.	PRESENCIA EN LA INDUSTRIA:	28
1.4.2.1.	INDUSTRIA DEL TRASPORTE.....	28
1.4.2.2.	INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.....	31
1.4.2.3.	INDUSTRIA TEXTIL:	32
1.5	ESTADO ACTUAL.....	33
1.6	CONCEPTOS TEÓRICOS BÁSICOS	34

1.6.1.	TENSIONES:	34
1.6.1.1.	VECTOR DE TENSIÓN:	35
1.6.1.2.	ESTADO DE TENSIÓN EN UN PUNTO	35
1.6.2.	DEFORMACIONES	35
1.6.2.1.	PEQUEÑAS DEFORMACIONES:.....	36
	• Tensor de Cauchy Green (Tc):.....	36
1.6.2.2.	GRANDES DEFORMACIONES	37
	• Tensor de Piola-Kirchhoff (TR):.....	37
1.7	OBJETIVO.....	39
2.	COMPORTAMIENTO DE LOS ADHESIVOS	40
2.1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	40
2.1.1.	INTRODUCCIÓN: TEORÍA DEL COMPORTAMIENTO ELÁSTICO, PLÁSTICO O VISCO-ELÁSTICO:	40
	• Comportamiento elástico:.....	40
	• Comportamiento visco-elástico:	40
	• Comportamiento plástico:	41
2.1.2.	COMPORTAMIENTO DE ADHESIVOS HIPERELÁSTICOS:	41
2.1.2.1.	INTRODUCCIÓN:	41
2.1.2.2.	COMPORTAMIENTO LINEAL:	42
2.1.2.3.	COMPORTAMIENTO NO LINEAL:.....	42
	• Comportamiento hiperelásticos:	42
	• Comportamiento viscoso:	45
	• Comportamiento visco-elástico:	45
	○ Formulación con viscoelasticidad	46
	○ Efecto Mullins:	48
	○ Efecto de histéresis y resiliencia:	48
	• Formulación de no linealidad:	49

I.	Formulación para incompresibilidad	52
II.	Formulación para compresibilidad	52
2.2	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	53
2.2.1.	INTRODUCCIÓN:.....	53
2.2.2.	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS:	54
2.2.2.1.	MÓDULO DE YOUNG:	54
2.2.2.2.	COEFICIENTE DE POISSON:.....	57
2.2.2.3.	MÓDULO DE CORTE:.....	58
2.2.2.4.	MÓDULO VOLUMÉTRICO O COMPRESIBILIDAD:.....	59
2.2.3.	CONSTANTES DE MATERIALES HIPERELÁSTICOS	60
2.2.3.1.	MODELOS HIPERELÁSTICOS	61
•	MODELOS FENOMENOLÓGICOS:	62
I.	Polynomial model:.....	62
II.	The Mooney-Rivlin model (M-R):	62
III.	The Ogden model:	62
•	MODELOS EXPERIMENTALES:	63
I.	Rivlin and Saunders model:.....	63
II.	Yeoh's Approximation:	63
•	MODELOS FÍSICOS:.....	64
I.	Neo-Hookean model (N-H):	64
II.	The Isihara model:	64
III.	Arruda-Boice o 8-chain model:	64
2.2.3.2.	MODELOS CON EFECTO DE MULLIS.....	65
I.	Ogden-Roxburgh Model:.....	65
II.	Qi-Boyce Model:	66
III.	Bergstrom-Boyce Model (B-B):	66
2.2.4.	GEOMETRÍA DE LOS ENSAYOS:	67
2.2.4.1.	ENSAYOS CARACTERIZACIÓN CONSANTES HIPERELÁSTICAS:.....	67
I.	Tensión uniaxial:.....	67

○	Ensayo de tracción:	68
○	Compresión:	68
○	Cizalladura simple:.....	69
II.	Tensión plana:.....	70
○	Cizalladura Pura:	70
○	Planar tensión test ring:	70
III.	Tensión biaxial:.....	71
○	Equi-biaxial de tijera:	71
○	Buble test ring:	72
2.2.4.2.	SIMULACIÓN PARA LAS CONSTANTES HIPERELÁSTICAS: 72	
2.2.4.3.	NUEVOS MODELOS CONSTITUTIVOS.....	74
2.3	CARACTERÍSTICAS DE ROTURA	75
2.3.1.	INTRODUCCIÓN:.....	75
2.3.2.	MECÁNICA A LA FRACTURA:	76
2.3.2.1.	MECÁNICA A LA FRACTURA ELASTO-LINEAL (MFEL):	77
•	Curva R.....	78
•	Factor de intensidad de tensiones	79
•	Corrección de Irwin	79
2.3.2.2.	MECÁNICA A LA FRACTURA ELASTO-PLASTICA (MFEP): .	79
•	Determinación de apertura del frente de grieta	80
•	Integral J:	81
•	Relación entre intelgral J y CTOD	83
•	Curva R.....	83
2.3.3.	ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DE MECÁNICA DE FRACTURA.....	83
2.3.3.1.	MODO I: ENERGÍA DE ROTURA A PELADO.	84
•	GEOMETRÍA:	84
○	Double Cantilever Beam (DCB):	84
○	Tapered Double Cantilever Beam (TDCB):.....	85

•	OBTENCIÓN DE ENERGÍA MODO I:.....	85
I.	Método de reducción de datos:	85
○	Simpel Beam Theory (SBT):.....	86
○	Corrected Beam Theory (CBT):.....	86
○	Experimental Compliance Method (ECM):	87
II.	Método de grieta equivalente:.....	87
2.3.3.2.	MODO II: ENERGÍA DE ROTURA A CORTADURA.....	89
•	GEOMETRÍA:	89
○	End-Notched-Flexure (ENF).....	89
○	End-Loaded-Split (ELS)	89
○	4 End-Notched-Flexure (4ENF).....	90
○	SLJ o TAST.....	91
•	OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA MODO II:.....	91
I.	Método de reducción de datos:	91
○	Compliance Calibration Method (CCM):	91
○	Corrected Beam Theory (CBT):.....	91
○	Direct Beam Theory (DBT):	92
II.	Método de grieta equivalente:.....	92
2.3.4.	MECÁNICA DE DAÑO:.....	93
2.3.4.1.	MODELO DE ZONA COHESIVA	94
•	Ley cohesiva:.....	95
•	Crecimiento de grieta en la zona cohesiva:	96
•	Parámetros de la zona cohesiva	97
•	Modelo de zona cohesiva en la bibliografía:	99
2.3.5.	MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN HIPERELÁSTICA: ...	103
•	Integral J:.....	103
•	Teoría de Tearing:	105
•	Modelo con límite energético	107
2.3.6.	MÉTODOS EMPLEADOS EN LOS TRABAJOS REVISADOS	110

2.3.7.	IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA PARA FRACTURA.....	112
3.	ELABORACIÓN DEL PLAN DE ENSAYO.....	115
3.1	PLAN DE ENSAYO PARA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA:	115
3.1.1.	MÓDULO DE YOUNG.....	115
3.1.1.1.	ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO:.....	116
	• ISO 527:.....	116
	• ISO 37:2007:	117
	• ASTM D412:	117
3.1.1.2.	DISEÑO DE LOS UTILLAJES:	119
3.1.1.3.	EJECUCIÓN DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS:.....	120
3.1.1.4.	EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS:.....	123
3.1.2.	MODULO DE CORTE.	123
3.1.2.1.	ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO:.....	124
	• Probeta de SLJ (ISO4587:2003 e ISO 13445:2003)	124
	• Probeta de TAST:	125
3.1.2.2.	DISEÑO DE LOS UTILLAJES.....	125
3.1.2.3.	EJECUCIÓN DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS:.....	126
3.1.2.4.	EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS.....	127
3.1.3.	COEFICIENTE DE POISSON.	127
3.1.3.1.	ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO.....	128
3.1.3.2.	PREPARACIÓN DE LOS UTILLAJES.....	128
3.1.3.3.	EJECUCIÓN DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS:.....	128
3.1.3.4.	EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS.....	129
3.1.4.	MÓDULO DE COMPRESIBILIDAD.....	130
3.1.4.1.	ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO:.....	130
3.1.4.2.	DISEÑO DE LOS UTILLAJES.....	131
3.1.4.3.	EJECUCIÓN DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS:.....	132

3.1.4.4.	EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS.....	133
3.1.5.	PARÁMETROS DE MODELOS HIPERELÁSTICOS	133
3.1.5.1.	ENSAYOS EXPERIMENTALES:	134
•	TENSIÓN UNIAXIAL:	134
I.	Elaboración de la probeta de ensayo.....	134
II.	Diseño de los utillajes.	136
III.	Ejecución del ensayo y toma de datos:	137
IV.	Representación del ensayo.....	138
•	TENSIÓN EQUI-BIAXIAL:.....	138
I.	Elaboración de la probeta de ensayo:.....	138
II.	Diseño de los utillajes:	139
III.	Ejecución del ensayo y toma de datos:	140
IV.	Representación del ensayo.....	140
3.1.5.2.	AJUSTE DE LOS MODELOS:	140
3.1.5.3.	ENSAYOS MEDIANTE SIMULACIÓN	142
I.	Diseño de la probeta:	142
II.	Condiciones contorno:	142
III.	Representación del ensayo:.....	143
3.2	PLAN DE ENSAYO PARA CARACTERIZACIÓN DE ROTURA:	143
3.2.1.	ENSAYO MODO I:	143
3.2.1.1.	ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO.....	143
3.2.1.2.	DISEÑO DE LOS UTILLAJES.....	145
3.2.1.3.	EJECUCIÓN DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS.....	146
3.2.1.4.	EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS.....	146
•	REPRESENTACIÓN DIAGRAMAS CARGA-DEFORMACIÓN ($P - \delta$)	147
•	CÁLCULO ENERGÍA FRACTURA G Y CURVA-R ($G - a$)	147
•	CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS COHESIVOS	149
o	Energía cohesiva:	149

○	Esfuerzo cohesivo:	149
○	Rigidez inicial:	150
•	IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA	150
3.2.2.	ENSAYO MODO II:	151
3.2.2.1.	ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO	151
3.2.2.2.	DISEÑO DE LOS UTILLAJES	152
3.2.2.3.	EJECUCIÓN DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS	152
3.2.2.4.	EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS	153
•	REPRESENTACIÓN DIAGRAMAS CARGA-DEFORMACIÓN ($P - \delta$) 153	
•	CÁLCULO ENERGÍA DE FRACTURA G Y CURVA-R ($G - a$)	154
•	CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS COHESIVOS	155
○	Energía cohesiva:	155
•	IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA	156
3.2.3.	ENSAYO ROTURA MATERIAL HIPERELÁSTICO	157
4.	CONCLUSIÓN	162
5.	ANEXO	164
5.1	PLANOS	164
5.1.1.	Útil montaje de probetas en máquina de tracción:	164
5.1.1.1.	Plano 1: Soporte para probetas en máquina de ensayo universal	164
5.1.2.	Útil lámina adhesivo	164
5.1.2.1.	Plano 2: Barras separadoras	164
5.1.2.2.	Plano 3: Base montaje	164
5.1.2.3.	Plano 4: Parte superior	164
5.1.3.	Plano5: Útil montaje probetas	164
5.1.3.1.	Plano 6: Base	164
5.1.3.2.	Plano 7: Pletina lateral	164
5.1.3.3.	Plano 8: Tapa	164

5.1.3.4.	Plano 9: Sustrato inferior probeta tipo 2.....	164
5.1.3.5.	Plano 10: Separador probeta tipo 2.....	164
5.1.3.6.	Plano 11: Parte inferior y superior probeta tipo 1.....	164
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	176
6.1	DOCUMENTOS BIBLIOGRÁFICOS.....	176
6.2	OTROS DOCUMENTOS.....	186



Ilustración 1:a) Adhesivo sintético. [21] b) Adhesivo natural. [11]	18
Ilustración 2: Esquema básico de unión adhesiva. [22]	21
Ilustración 3: Teoría de adhesión química. Sánchez Matrán, F. (2010).....	21
Ilustración 4: Teoría de la difusión. [22]	22
Ilustración 5: Modelo de la adhesión mecánica. [22].....	22
Ilustración 6: Teoría eléctrico. [22]	22
Ilustración 7: Diferenciación entre adhesión y cohesión. [22]	23
Ilustración 8: Modo de fallo en uniones adhesivas. Fallo adhesivo/fallo mixto/fallo cohesivo/fallo de sustrato. [22].....	23
Ilustración 9: Diferentes tipos de sollicitaciones en uniones adhesivas. Ocaña López, R. (2017)	24
Ilustración 10: Tablas con tipos de uniones. Ocaña López, R. (2017).....	26
Ilustración 11: Adhesivos en automóviles. [13]	30
Ilustración 12: Adhesivos en trenes. Burchardt.B (2010)	30
Ilustración 13: Adhesivo en barcos. [5].....	31
Ilustración 14: Adhesivo en calzado. [7; 14].....	33
Ilustración 15: Descomposición de fuerzas. [27]	35
Ilustración 16: Deformación del plano. [27]	37
Ilustración 17: Diagramas de tensión-deformación: elástico, hiperelástico, viscoelástico. [9]	40
Ilustración 18: Diagramas de tensión-deformación hiperelástico. Canseco de la Cruz, R. A (2011).....	43
Ilustración 19: Esquema modelo visco-elástico de Maxwell. Masoliver i Marcos, G (2017)	47
Ilustración 20: Esquema modelo visco-elástico de Kelvin-Voigt. Masoliver i Marcos, G (2017)	47
Ilustración 21: Esquema modelo visco-elástico de Burges. Masoliver i Marcos, G (2017)	47
Ilustración 22: Diagrama con tensión-deformación con efecto Mullins. Ogden, R. W (1999)	48
Ilustración 23: Diagrama tensión-deformación de ciclo de carga y descarga para elastómero a tracción. [16]	49

Ilustración 24: Diagrama muelle amortiguador. Aranda-Iglesias, D (2017).....	50
Ilustración 25: Diagrama tensión-deformación. Cabello, M (2016)	55
Ilustración 26: Estados tensionales: uniaxial, biaxial, triaxial. [23].....	67
Ilustración 27: Probeta tracción uniaxial. Sasso, M (2008).....	68
Ilustración 28: Probeta compresión uniaxial. Amstutz, C (2018)	69
Ilustración 29: Probeta de cizalladura SLJ y TAST. Chiminelli, A (2019); [32].....	69
Ilustración 30: Probeta de cizalladura pura. Amstutz, C (2018); Crocker, L (1999)	70
Ilustración 31: Probeta de cizalladura pura. Sasso, M (2008).....	71
Ilustración 32: Probeta de tracción biaxial. Amstutz, C (2018)	72
Ilustración 33: Probeta de buble test. Sasso, M (2008)	72
Ilustración 34: Modo de apertura de grieta. [3]	76
Ilustración 35: Curva R para dos materiales distintos. [3]	78
Ilustración 36: Apertura frente de grieta CTOD. [3].....	81
Ilustración 37: Diagrama tensión-deformación para dos materiales distintos. [3]	81
Ilustración 38: Curva R para material dúctil. [3].....	83
Ilustración 39: Probeta de Double Cantilever Beam. Chaves, F. J. P (2014).....	85
Ilustración 40: Probeta de Tapered Double Cantilever Beam. Chaves, F. J. P (2014)...	85
Ilustración 41: Probeta de End-Notched-Flexure. Chaves, F. J. P (2014).....	89
Ilustración 42: Probeta de End-Loaded-Split. Chaves, F. J. P (2014).....	90
Ilustración 43: Probeta de 4 End-Notched-Flexure. Chaves, F. J. P (2014).....	90
Ilustración 44: Probeta de TAST y SLJ. Sasso, M (2008); Amstutz, C (2018)	91
Ilustración 45: Diferentes curvas de modelo cohesivo. García Garino, C. G (2013).....	96
Ilustración 46: Crecimiento de la punta de grieta en zona cohesiva. Elmukashfi, E (2013)	97
Ilustración 47: Probeta de tensión plana y desgarro. Guo, H (2019).....	106
Ilustración 48: Probeta de SENT y DENT. Hocine, N. A (2002)	107
Ilustración 49: Probeta de perro ISO 527. Duncan, B (2001)	116
Ilustración 50: Probeta hueso de perro ISO 37:2007. Duncan, B (2001).....	117
Ilustración 51: Probeta hueso de perro ASTM D412. Staudt, Y (2018)	118
Ilustración 52: Útil preparación láminas de adhesivo.	118
Ilustración 53: Útil preparación probetas de hueso de perro. Dias, V (2014).....	119

Ilustración 54: Diferentes máquinas de ensayo universal. Amstutz, C (2018); Staudt, Y (2018); [24].....	119
Ilustración 55: Sistema de sujeción para hueso de perro.....	120
Ilustración 56: Célula de carga (compresión/tracción). {10}	121
Ilustración 57: Métodos de medición. Brown, R. (2002)	121
Ilustración 58: Métodos de medición. Brown, R. (2002)	122
Ilustración 59: Diagrama hiperelástico. {18}	123
Ilustración 60: Medidas probeta SLJ. Lubowiecka, I (2012)	124
Ilustración 61: Probeta SLJ. Nunes, L. C. S. (2011)	124
Ilustración 62: Sustrato de probeta TAST.	125
Ilustración 63: Útil para fabricación de probetas.....	125
Ilustración 64: Brazos para probeta TAST y SLJ.....	126
Ilustración 65: Deformación en probeta SLJ. Moreira, D. C (2013).....	126
Ilustración 66: Probeta hueso de perro para Poisson. Amstutz, C (2018).....	128
Ilustración 67: Diagrama de deformación con coeficiente de Poisson. Duncan, B (2003)	129
Ilustración 68: Diagrama de deformación con coeficiente de Poisson. Chiminelli, A (2019); Amstutz, C (2018).....	131
Ilustración 69: Útiles para ensayo de compresión confinada. Peng, S. H (1994); Amstutz, C (2018)	131
Ilustración 70: Útiles para compresión. Staudt, Y (2018)	132
Ilustración 71: Probeta para tensión plana. Amstutz, C (2018).....	135
Ilustración 72: Útil para tensión plana. Sasso, M (2008)	136
Ilustración 73: Útiles para tensión plana. Duncan, B (2003); Kim, B (2012); Moreira, D. C (2013).....	136
Ilustración 74: Útil de diseño propio para tensión plana.	137
Ilustración 75: Representación de deformación tensión plana. Moreira, D. C (2013) .	138
Ilustración 76: Probeta de cruz tensión bi-axial. Amstutz, C (2018)	138
Ilustración 77: Probeta para tracción bi-axial. Duncan, B (2001).....	139
Ilustración 78: Utillaje para tracción bi-axial. Duncan, B (2003); Amstutz, C (2018)	139
Ilustración 79: Gráfica simulación de ensayos de tensión-deformación. {15}	141

Ilustración 80: Gráfica simulación de ensayos de tensión-deformación. Amstutz, C (2018)	141
Ilustración 81: Representación apertura modo I. Chaves, F. J. P (2012)	143
Ilustración 82: Probetas para modo I.	144
Ilustración 83: Útil para probetas de modo I.	144
Ilustración 84: Representación probetas de modo I. De Moura, M. F. S. F (2008)	144
Ilustración 85: Sujeción de probetas de modo I.	145
Ilustración 86: Representación de diagrama carga-deformación. De Moura, M. (2008)	147
Ilustración 87: Representación de diagrama energía-apertura (curva-R). De Moura, M. (2008)	148
Ilustración 88: Representación curva típica deformación modo I. Zhou, Q.-C (2013)	149
Ilustración 89: Probeta uniaxial de tracción para esfuerzo cohesivo I. Zhou, Q.-C (2013)	150
Ilustración 90: Representación apertura modo II. Chaves, F. J. P (2014).....	151
Ilustración 91: Probeta diseño propio modo II.	152
Ilustración 92: Utillaje para probetas de modo II.	152
Ilustración 93: Diagrama carga-deformación de probeta modo II. Niu, R.-M (2014) .	154
Ilustración 94: Modelo simulación numérica para probeta modo II. Hasegawa, K (2015) Parte 1	154
Ilustración 95: Representación carga-desplazamiento probeta TAST. Hasegawa, K (2015) Parte 1	154
Ilustración 96: Diagrama energía-apertura (curva-R). Chaves, F. J. P (2012).....	155
Ilustración 97: Representación curva típica deformación modo II. Zhou, Q.-C (2013)	156
Ilustración 98: Comparación modelo experimental con simulación.	157
Ilustración 99: probeta tensión plana con pre-grieta. Guo, H (2019).....	158
Ilustración 100: diagrama tensión-deformación tensión plana. Guo, H (2019)	160

LISTADO DE ABREVIATURAS:

PVA: poliacetato de vinilo

PVC: policloruro de vinilo

UV: ultravioleta

CAD: Computer-Aided Design

M-R: Mooney-Rivlin

N-H: Neo-Hookean

B-B: Bergstrom-Boyce

SLJ: Single Lap Joint

TAST: thick adherend shear test

FPZ: Zona de proceso de fractura

MFEL: Mecánica de fractura elástica lineal

MFEP: Mecánica a la fractura elasto-plástica

CTOD: Apertura frente de grieta

DCB: Double Cantilever Beam

TDCB: Tapered Double Cantilever Beam

CBT: Corrected Beam Theory

SBT: Simpel Beam Theory

ECM: Experimental Compliance Method

CBBM: compliance-based beam method

ENF: End-Notched-Flexure

ELS: End-Loaded-Split

4ENF: 4 End-Notched-Flexure

CCM: Compliance Calibration Method

DBT: Direct Beam Theory

CZM: Cohesive zone model

CDM: Continuo damage mechanic

NR: natural rubber

SBR: styrene-butadiene rubber

SENT: Single Edge Notched in Tension

DENT: Double Edge Notched in Tension

CBTE: Corrected Beam Theory with Effective Crack Length

DIC: Digital Image Correlation



1. INTRODUCCIÓN.

1.1 EVOLUCIÓN:

El uso de adhesivos se remonta prácticamente a los inicios del ser humano, desde la prehistoria se han ido empleando en la vida del hombre, según se expone en la referencia [17], la prueba más antigua que se ha encontrado data de hace 80.000 años, un alquitrán vegetal. Partiendo en un inicio, del uso de sustancias naturales, ya fuesen animales, vegetales o minerales, las técnicas de adhesión han permitido al hombre evolucionar hasta la actualidad. En el recorrido de la historia de estos materiales, es en el imperio romano donde se datan los primeros estudios acerca del uso de adhesivos y no será hasta el siglo XVIII donde vuelve a surgir un importante interés por su estudio y el posterior aumento en la implementación de las uniones de cualquier tipo, pero siendo aun con material de origen natural. Finalmente, coincidiendo con el crecimiento de la industrialización, a comienzos del siglo XX, la industria química empieza a desarrollar los primeros adhesivos en laboratorio. Fue Fritz Klatte en 1912 quien con eteno y ácido acético logró obtener el poliacetato de vinilo (PVA).

A lo largo de todo el siglo XX y parte del XXI se han ido incorporando nuevos compuestos: los poliuretanos por Bayer.O en 1937, la resina fenólica con Bruyne.N.A en 1940, en 1944 el adhesivo epoxi de Preiswerk.E, los silanos modificados en 1970, y los termofusibles sobre 1980. Hasta el día de hoy han ido apareciendo continuamente nuevos compuestos, generando una gran variedad de material adhesivo, donde existen una amplia diversidad de propiedades distintas, permitiendo que de este modo su uso este tan extendido.

Actualmente existen dos grandes clasificaciones básicas, los adhesivos naturales y los sintéticos. Si bien es cierto que en la actualidad son los sintéticos los que dominan por su extendido uso, en algunas aplicaciones aun se encuentran naturales. De esta forma, podríamos establecer la división como:

- Adhesivos sintéticos: se elaboran mediante polímeros con base en los hidrocarburos en un laboratorio.
- Adhesivos naturales: tanto de origen animal (pieles o sustancias) como vegetales (de segregaciones o extracciones de sus células).



Ilustración 1:a) Adhesivo sintético. [21] b) Adhesivo natural. [11]

En el caso del tipo natural, el origen animal se remonta al principio de su historia, estando ahora en desuso, sin embargo, los vegetales siguen presentes a día de hoy y se muestran en numerosas ocasiones como alternativas para reducir el uso del petróleo en los sintéticos. [17]

1.2 CLASIFICACIONES DE ADHESIVOS:

1.2.1. SEGÚN PROPIEDADES:

Dado que los adhesivos sintéticos están mucho más extendidos, la mayoría de clasificaciones se basan en estos, pero como se muestra en el documento [29] existen diferentes puntos de vista:

- Número de componentes: monocomponente, con un único reactivo o bicomponente, los cuales presentan dos reactivos que se unen para realizar el curado.
- Naturaleza final y estructura tras el curado:
 - Termoplásticos: permiten deformarse varias veces al aplicar calor.
 - Elastómeros: pueden variar su forma con la aplicación de fuerzas y recuperarla tras la cesión de las mismas
 - Termoestables: una vez obtenida su forma no podrá cambiarse
- Naturaleza del curado: pudiendo ser químico o físico. En el curado físico el polímero base se cura mediante aplicaciones de fuerza, temperatura, etc.; mientras que el curado químico es la reacción entre varios polímeros lo que genera la base del adhesivo.
- Propiedades mecánicas: distinguiendo entre elásticos o rígidos.
- Estado inicial: pudiendo encontrarse con un estado de líquido o gaseoso.

1.2.2. SEGÚN EL CURADO:

Además de las categorías anteriores, la clasificación que se encuentra más extendida en el uso de los adhesivos para la industria, que es la que nos atañe, es en función del proceso que sea necesario para el curado y formación de la unión. De esta forma nos encontramos con:

1.2.2.1. ADHESIVOS PREPOLIMERIZADOS:

Reciben este nombre porque el polímero ya se encuentra formado antes de efectuarse el curado. Podrán encontrarse en fase líquida (colas, caucho natural adhesivos de PVC) o en fase sólida (adhesivos de contacto o termofusibles). El curado en el caso de este tipo requerirá de un proceso físico.

1.2.2.2. ADHESIVOS REACTIVOS:

Podrá presentarse en diferentes estados, el proceso de curado requerirá un proceso de polimerización, donde se formarán las cadenas de polímeros al aplicarlo sobre la zona de trabajo o sustratos. Este tipo de curado influye en el tiempo de curado y manipulación del material antes de llegar a su estado final. Se podrán distinguir en dos grupos como se ve en (Marckmann, G (2006); Sánchez Matrán, F. (2010)) y el documento [26].

- Policondensación: recibe el nombre la reacción de polimerización donde uno o más monómeros se unen para formar una cadena mayor, teniendo también la liberación de otros subproductos. Este es un proceso lento.
- Poliadicción: se crea una macromolécula (cadena polimérica) compuesta por la repetición del mismo monómero una y otra vez, sin dar lugar a otros subproductos liberados. Es un proceso que se da en cadena y a alta velocidad.

Dentro de los adhesivos reactivos se establece una clasificación en función de su comportamiento una vez curados:

- Rígidos: Anaeróbicos, cianocrilatos, Epoxis.
- Tenaces: Anaerobios tenaces, cianocrilatos tenaces, acrílicos, adhesivos de curado UV y epoxis tenaces.
- Flexibles: siliconas, poliuretanos y silanos modificados

1.2.3. TABLA CLASIFICATORIA

Para el futuro uso de los diferentes adhesivos, vamos a desarrollar una tabla donde clasificarlos y poder obtener algunas de sus propiedades más relevantes:

Adhesivo	Comportamiento	Resistencia a temperatura	Agentes externos
Epoxis	Termoestables, resistencia a la tracción y el corte. Poca resistencia a pelado		Resistentes a humedad, grasas y disolventes
Epoxi híbridos	Adquieren propiedades de los polímeros que se le incorporan		
Fenólicos	Mejora la resistencia a altas temperaturas de los epoxis	Hasta 175° constantes o 260° puntuales	Resistencia a grasas, disolventes y humedad
Poliuretanos	Resistencia a cortadura y pelado, baja para la tracción	Hasta los 150°	Buena resistencia química y baja a humedad
Anaerobios			
Cianocrilatos	Baja resistencia a pelado e impacto		Baja resistencia al calor y humedad
Acrílicos modificados	Elevada resistencia a cizalladura	Mantiene su propiedades mecánicas entre -100° y 120°	Buena resistencia a humedad

1.3 CONCEPTOS BÁSICOS.

1.3.1. UNIÓN ADHESIVA:

Una unión adhesiva se define como la unión entre dos superficies mediante la acción de la sustancia adhesiva. Dentro de este sistema de unión se pueden diferenciar los siguientes elementos:

- Sustratos: también denominados adherentes, constituyen los elementos que pretenden ser unidos.
- Adhesivo: sustancia que se aplicará entre los dos adherentes para crear la unión.
- Interfase: zona de transición entre el material adhesivo y el adherente.



Ilustración 2: Esquema básico de unión adhesiva. [22]

1.3.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO:

1.3.2.1. FUERZAS DE UNIÓN:

La unión de los adherentes por el adhesivo se da gracias a la acción de dos fuerzas distintas, que tienen lugar de manera conjunta en el mecanismo de unión, como se expone en el trabajo de Ocaña López, R. (2017) y los documentos [22; 1]:

- Fuerza de adhesión: tendrá lugar entre la superficie del adherente y el adhesivo. Se trata de un mecanismo complejo, donde por lo general se distinguen 5 métodos de adhesión, que tienen lugar de manera simultánea en la interfaz adhesivo-adherente:
 - Adhesión química: interacción química de las moléculas de los materiales afines, crean las uniones más fuertes cuando suceden.

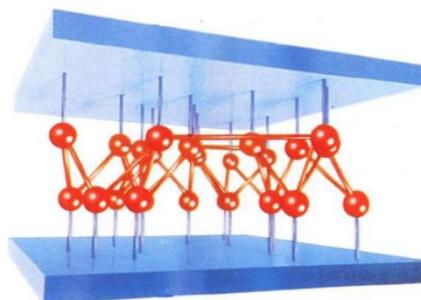


Ilustración 3: Teoría de adhesión química. Sánchez Matrán, F. (2010)

- Adhesión por difusión: para ciertos compuestos, las moléculas de ambos materiales son capaces de transferirse de uno al otro en la interfase, generando una unión por inter-difusión.

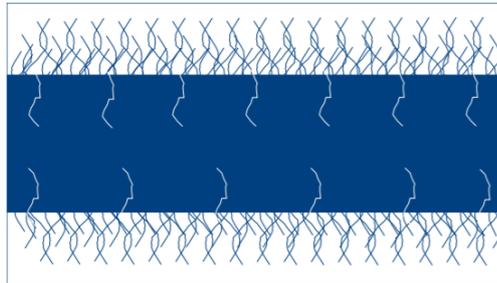


Ilustración 4: Teoría de la difusión. [22]

- Adhesión mecánica: tiene lugar por la introducción del adhesivo por los poros de la superficie del sustrato, siendo por tanto las superficies, un punto de interés a tratar.

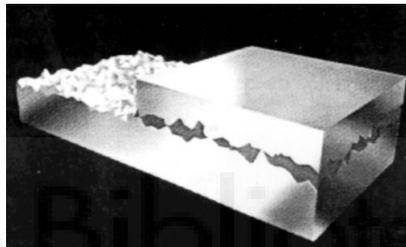


Ilustración 5: Modelo de la adhesión mecánica. [22]

- Adhesión por adsorción termodinámica: también denominado mojado superficial, tiene lugar por enlaces secundarios de tipo Van Der Waals entre las moléculas de ambas superficies en contacto.
- Adhesión electrostática: tiene lugar por la diferencia de cargas que existen entre las superficies en contacto de ciertos materiales.

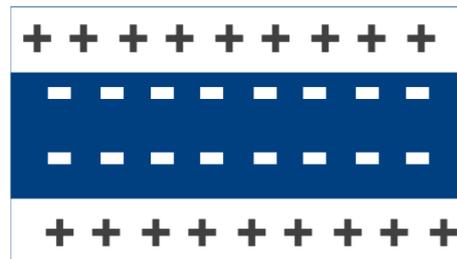


Ilustración 6: Teoría eléctrica. [22]

- Fuerzas de cohesión: se da en el interior del adhesivo, generado por las uniones intermoleculares de la sustancia adhesiva.

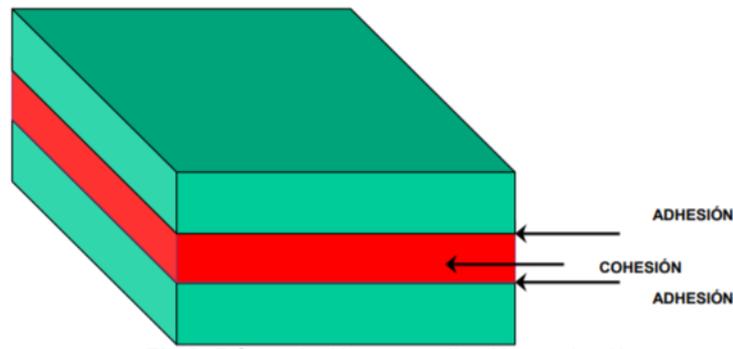


Ilustración 7: Diferenciación entre adhesión y cohesión. [22]

Como se ve en el documento [22], la acción conjunta de ambos mecanismos serán los que caractericen la unión.

1.3.2.2. TIPOS DE ROTURAS:

Dado que se está hablando de las uniones adhesivas, también será importante conocer los modos de rotura que puede experimentar, los cuales irán ligados a los de unión, en el documento [22] se muestran las clasificaciones típicas con su representación esquemática:

- Fallo adhesivo: tendrá lugar en la interfase, por la separación entre los dos materiales, adhesivo y adherente. Una de las características empleadas para comprobar que se trata de este fallo es observar si la superficie del adherente ha quedado limpia o si presenta restos del adhesivo.
- Fallo cohesivo: tendrá lugar una rotura del material adhesivo, las fuerzas intermoleculares que lo mantenían unido no son capaces de soportar el esfuerzo al que se ha sometido.
- Fallo del sustrato: las fuerzas de unión en el material del sustrato son menores a las de la unión y por tanto fallará en un esfuerzo menor.

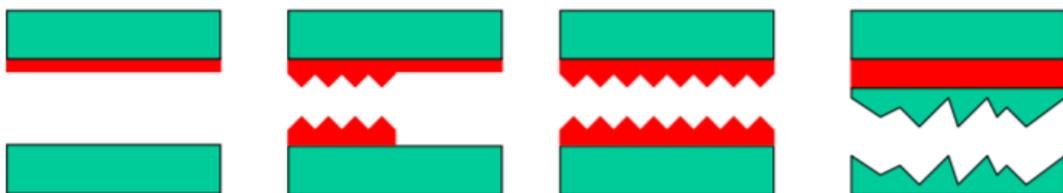


Ilustración 8: Modo de fallo en uniones adhesivas. Fallo adhesivo/fallo mixto/fallo cohesivo/fallo de sustrato. [22]

1.3.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA UNIÓN ADHESIVA

Como se expone en [1], podemos distinguir entre:

- Preparación superficial: como se vio anteriormente, las fuerzas de adhesión que tienen lugar en la interfase se dan por interacciones moleculares de ambas superficies. Por ello la preparación de la superficie antes de aplicar al material adhesivo afectará a como se comporte una vez generado los enlaces.
- Materiales de unión: al igual que antes, el tipo de material del que se componga el sustrato y la capa de adhesivo determinará la interacción molecular entre las moléculas de ambas partes, dando una cantidad de fuerza de unión determinada.
- Proceso de curado: como se exponía anteriormente, cada adhesivo tendrá un proceso de curado característico, donde entran en juego otros factores externos como presión, humedad, tiempo o temperatura. Todo esto hará que la unión tenga unas propiedades u otras en función del proceso que se haya elegido.
- Zona de trabajo: además de los factores anteriores, una misma unión adhesiva puede comportarse de manera distinta en función de cuál sea su lugar de trabajo. Esto es, los factores físicos a los que se expone, temperatura, presión, humedad, etc.; manera en la que recibe las cargas o las dimensiones de la unión.

1.3.4. TIPOS DE ESFUERZOS Y UNIONES

Las uniones llevadas a cabo con adhesivos pueden presentar distintas geometrías, sin embargo, como vimos anteriormente, es importante conocer como se deben realizar para que estén tengan la suficiente resistencia y sean capaces de aguantar los esfuerzos a los que van a ser sometidas.

1.3.4.1. ESFUERZOS

Tanto los debido a la transmisión de las fuerzas y energías, como a los ocasionados por las condiciones de trabajo de la unión se pueden representar como: esfuerzo normal de tracción y compresión, esfuerzo de cortadura, esfuerzo de pelado y esfuerzo de desgarro.



Ilustración 9: Diferentes tipos de sollicitaciones en uniones adhesivas. Ocaña López, R. (2017)

1.3.4.2. UNIONES

Para poder resistir los diferentes esfuerzos expuestos, se diseñan sistemas de unión donde estos puedan tener un menor efecto o sea más difícil llegar a causar un daño. Nos encontramos con 3 grandes grupos, como se muestra en el trabajo de Ocaña López, R. (2017):

- Uniones a tope: capaz de resistir la tracción y compresión siempre que se den de manera centrada, para no generar un momento y por consiguiente un esfuerzo de desgarro
- Uniones a solape: capaces de resistir cualquier esfuerzo, siendo más sensibles al pelado y desgarro ocasionados por el momento que se puede generar en la unión.
- Uniones en T y uniones en esquina: con sensibilidad por los esfuerzos de pelado y desgarro.

Dentro de cada clase se han desarrollado distintas geometrías para hacerlas más resistentes ante los esfuerzos, como ya se ha visto en varios apartados, los esfuerzos de pelado y desgarro son los que más debilitan las uniones y podrán estar presentes en todos los tipos de estas, por ello, se intenta solucionar por medio de mejoras en la geometría. De esta forma, tendremos algunas de las más empleadas recogidas en la siguiente tabla:

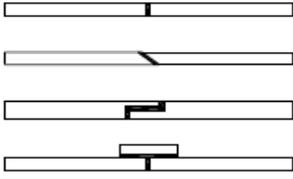
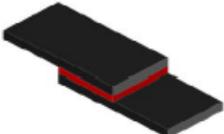
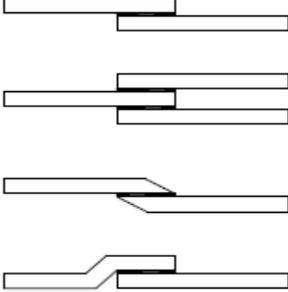
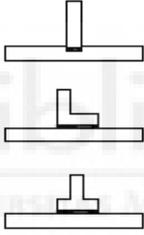
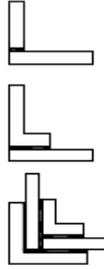
TIPOS DE UNIONES BÁSICAS	DISPOSICIONES MÁS COMUNES DE CADA TIPO	DENOMINACIÓN
 <p>Uniones a tope</p>		A tope simple
		A tope biselada
		Con escalón
		Con cubrejunta
 <p>Uniones a solape</p>		A solape simple
		A doble solape
		A solape biselado
		A solape superpuesto
 <p>Uniones en T</p>		Rebajada
		Con refuerzo
		Con refuerzo doble
 <p>Uniones en esquina</p>		Simple a tope
		Con refuerzo simple
		Con refuerzo doble

Ilustración 10: Tablas con tipos de uniones. Ocaña López, R. (2017)

1.4 APLICACIONES PARA UNIONES ADHESIVAS

A día de hoy, el uso de los adhesivos está ampliamente extendido en los procesos industriales, centrándose en el tema que acontece este trabajo, las uniones adhesivas en la industria permiten sustituir métodos tradicionales de unión u ofrecer nuevas posibilidades. Estas uniones están presentes en carrocerías de automóviles, fuselaje de aviones y naves espaciales, construcciones de edificaciones, aparatos electrónicos, aislamiento térmico y vibratorio. Como se ha visto anteriormente, la gran variedad que se ofrece entre las diferentes calificaciones del adhesivo lo dota de gran utilidad, debido a las diferentes propiedades que puede ofrecer. Algunas de las propiedades más importantes son su flexibilidad, la capacidad para aislar de vibraciones o la mayor capacidad de transferir las fuerzas entre las uniones debido al hecho de ser una unión continuada y no solo puntual, permitirá unir materiales de diferentes naturalezas, como recogen algunos autores en (Amstutz, C(2018); Chiminelli, A(2019) ; Dispersyn, J(2017)).

1.4.1. ATRACTIVO DEL PRODUCTO:

Las uniones con material adhesivo se han ido incorporando poco a poco en el sector industrial, desde el sector textil hasta el aeroespacial. Esta creciente incorporación en los últimos años se debe a las importantes ventajas que pueden obtenerse de sus usos, sin embargo, al ser una técnica bastante más moderna que el resto, las investigaciones llevadas a cabo sobre ello son mucho más reducidas, lo que supone gran parte de los inconvenientes. Tanto en los trabajos de Bermejo López, R (2016) y García Ledesma, R (2013) se muestran algunas de las m.

1.4.1.1. VENTAJAS:

- Reducción del peso: en comparación con los tornillos o la soldadura, el polímero del adhesivo es un material mucho más ligero, permitiendo reducir en gran medida el peso en ciertas aplicaciones donde resulta clave (automoción, aeroespacial o naval).
- Absorción de vibraciones: al poseer un comportamiento más elástico que los otros materiales, permite funcionar como aislamiento para no transmitir vibraciones a través de los sustratos.
- Trasmisión de cargas: los adhesivos se emplean como cordones continuos de unión, dándole una mejor transferencia de carga a lo largo de toda la superficie de unión, característica mucho más compleja de lograr con rosca o soldadura.

- Aislamiento: el uso de este material permite la dilatación de los materiales de los sustratos, absolviendo las variaciones. Además funcionará como sellante ante agentes externos como el polvo o el agua.
- Eliminación de concentradores de esfuerzos: unir los sustratos por medio de adhesivos permite eliminar los agujeros de los tornillos y las micro grietas resultantes de los procesos de soldadura, mejorando el comportamiento ante fatiga e impactos.

1.4.1.2. DESVENTAJAS:

- Temperatura de servicio: los polímeros que componen los adhesivos no son capaces de alcanzar temperaturas de trabajo tan elevadas como los metales.
- Poca resistencia a pelado: este tipo de uniones no trabajan bien los esfuerzos de pelado, lo que requiere mejorar la unión para evitarlos.
- Dependencia del proceso: frente a la soldadura o los tornillos, las características de las uniones con adhesivo depende mucho más del proceso de realización, ya sea la preparación de la superficie, los tiempos de curado o las dimensiones de los polímeros. Esto presenta una importante dificultad a la hora de la instalación.

1.4.2. PRESENCIA EN LA INDUSTRIA:

Como ya hemos visto los adhesivos presentan una gran cantidad de ventajas con respecto a las demás alternativas de unión, siendo incluso en numerosos casos la forma única posible o bien la más conveniente para la funcionalidad esperada. Algunas de las industrias donde representa una empleabilidad más alta son: industrias del transporte, naval, aérea, ferroviaria y automovilística, o para la industria de la construcción, tanto como aislamiento o sellado, como material de sujeción o elemento constructivo.

1.4.2.1. INDUSTRIA DEL TRASPORTE

En este sector los adhesivos suponen una importante evolución en el desarrollo de los productos. Cada vez se prioriza más el ahorro de costes en los procesos de construcción de los diferentes medios de transporte, los adhesivos estarán presentes en muchos de estos:

- Las uniones con adhesivos son más ligeras que las de soldadura o tornillos, permitiendo por tanto realizar máquinas más livianas, con menores consumos y emisiones de gases contaminantes.
- Permiten realizar un proceso de unión en numerosos casos mucho más veloz y con menos preparación que su competencia

Algunos de los ejemplos más representativos de las diferentes aplicaciones en cada sector serán:

- Automoción: en el documento [19] se explica su extensa implicación en este sector. Se aplicarán los adhesivos para el pegado de rebordes a lo largo de toda la carrocería del automóvil, estos son aquellos que se encuentran en las piezas que presentan movimientos de apertura y cierre en el automóvil, cuentan con una parte externa realizada mediante estampación y otra interna que se unen por medio del adhesivo, durante el proceso de pintura, una estufa finalizará el curado dando la resistencia requerida. De igual forma nos encontramos con las uniones de los vidrios fijos en el vehículo, que constituyen en la actualidad un elemento estructural del vehículo muy importante, se tiene especial consideración por tanto en este proceso, con una preparación previa de promotores de adhesión y la posterior protección en el vidrio para que la radiación UV no la degrade. Por último dentro de esta industria existen la aplicación de los adhesivos para la fijación de las uniones de tipo roscado.

De manera paralela a los automóviles, en el desarrollo de los Formula 1 son de vital importancia debido a la necesidad de reducir al máximo el peso de los vehículos, siendo aplicados en numerosos sistemas de su funcionamiento: cojinetes de las manivelas de suspensión, fijación de los espárragos de la tapa de balancines, fijación de la pantalla del casco o fijación del fondo plano. Esta continua innovación hace posible su futura incorporación de muchos de los métodos a los productos de venta al público.

Los adhesivos que se suelen emplear en este sector deben cumplir una serie de requisitos, entre los más importantes cabe destacar: capacidad para el dispensado automático, buena penetración, durabilidad por encima de la vida útil de un vehículo bajo altas cargas, buena estabilidad a temperaturas de entorno a 200°C y buena permanencia en las superficies durante su tratado.

De manera general, el uso de las uniones con adhesivos en automóviles se ha multiplicado rápidamente en el último siglo, si tomamos por ejemplo un vehículo de alta gama como el BMW serie 7 de principios de siglo con el actual, la cantidad de metros de adhesivos empleados es de hasta 15 veces superior. Este hecho es el que ha permitido que el uso de soldadura se reduzca a la mitad. Estos datos son reflejados también en las pruebas de seguridad, donde se ha comprobado como el ensamblaje con adhesivos presenta un comportamiento mucho mejor que con la soldadura o

tornillos, las cargas se distribuyen de manera más uniforme entre las uniones y más predecibles, facilitando por tanto un diseño más seguro.



Ilustración 11: Adhesivos en automóviles. [13]

- Ferroviaria: los adhesivos son un elemento clave para los ingenieros en el diseño de estos medios de transporte. Debido a las altas velocidades que pueden alcanzar, los esfuerzos aerodinámicos y los agentes externos se generan grandes inconvenientes a la hora de la construcción de su parte externa. Como se muestra en (Burchardt.B (2010)), los adhesivos con un comportamiento elástico son de gran utilidad en este sentido.

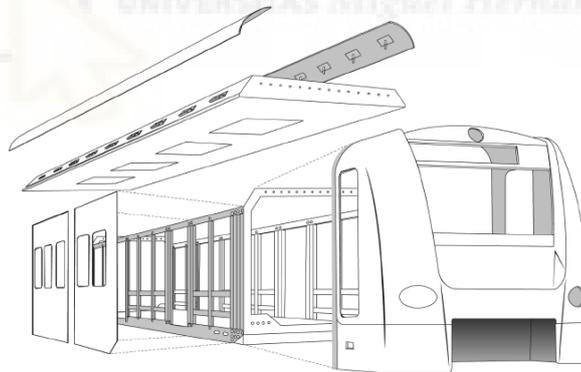


Ilustración 12: Adhesivos en trenes. Burchardt.B (2010)

- Aeronáutica: en esta industria los adhesivos han estado presentes desde sus inicios, son de especial importancia en la unión de los diferentes sustratos de los paneles de tipo sándwich con los que se realiza el fuselaje de las naves aéreas. Como se explica en el documento [8], se aplicará el adhesivo entre el núcleo y las capas externas. La implementación del este proceso de unión ha permitido reducir en gran medida el peso de estos aparatos, que es uno de sus mayores inconvenientes en el desarrollo. Además del panel sándwich para el fuselaje, el uso de adhesivos junto a los nuevos materiales compuestos que se han ido desarrollando a lo largo de los años

ha contribuido a reducir cada vez más el peso innecesario. Materiales como la fibra de carbono, de vidrio, metales ligeros donde las uniones adhesivas han permitido su unión, la mejora de la resistencia y transferencia de cargas, así como la agilidad en el proceso de producción, ahorrando el paso de taladrar las superficies.

- Naval: al igual que en las anteriores industrias la introducción de los métodos de uniones adhesivas a permitido solucionar los problemas que se generaban por parte de las soldaduras o las uniones soldadas, así como incluso mejorar la unión. En este sentido, las aplicaciones más importantes que se muestra en (Sánchez Matrán, F. (2010)), en este campo, se van a desarrollar en torno a la capacidad de sellado, para eliminar las fugas entre los distintos sustratos a unir, así como el ensamblaje de paneles de sándwich para la construcción del cuerpo de la nave.



Ilustración 13: Adhesivo en barcos. [5]

1.4.2.2. INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

En este sector los adhesivos tienen una menor importancia, pues han sido incorporados de manera más reciente, no obstante, si ofrecen numerosas ventajas en muchas de sus aplicaciones. Diferenciando los usos que se pueden dar nos encontramos con: sellador, estructural o sujeción.

Los adhesivos que se emplean para sellar las juntas entre diferentes materiales o bien para reparar las grietas que se han ocasionado por el paso del tiempo permiten aislar la estructura de los agentes externos y por tanto extender su vida de servicio. Por otro lado, son también de gran importancia para la colocación de cristaleras en las fachadas, un recurso arquitectónico muy creciente en la actualidad, ofreciendo ventajas frente a la sujeción con rosca, pudiendo reducir la concentración de tensiones y mejorar el aislamiento entre la estructura portante y el cristal. Por último, el uso de adhesivo como material estructural es de las tres, la aplicación más reciente y aun en proceso de expansión. Es especialmente empleada para en ensamblado de los materiales

compuestos con los que se van a desarrollar estas nuevas estructuras que sustituirían a las tradicionales vigas o columnas de hormigón y acero.

1.4.2.3. INDUSTRIA TEXTIL:

Otra gran rama en la utilización de los adhesivos es la industria textil, como se expone en el trabajo de Elena Orgilés (2016) o el documento [20], en prácticamente cualquier producto podrán estar presentes estos materiales, desde la suela de una zapatilla hasta la copa de un sujetador, pasando también por materiales no orientados a la vestimenta pero si con tejido, como los estropajos, los muebles, las telas aislantes en construcción o los interiores de vehículos.

- Calzado: de manera general, los materiales del calzado que se unen por medio de adhesivos son la plantilla, el corte (la horma) y el piso (suela). La incorporación del material adhesivo ha sido una verdadera revolución para la fabricación en serie del calzado, permitiendo sustituir gran parte los lentos procesos de cosido, agilizando y abaratando el proceso.
- Tejidos: en la industria textil, donde existen diferentes tipos de prendas que requieren de una superposición de capas, se emplea el uso de adhesivos para el ensamblaje. En ropa de tipo deportiva se empleará para unir los tejidos transpirables; en ropa de trabajo se busca una resistencia muy alta tanto para el modo de empleo en el trabajo como para la posterior limpieza agresiva de las prendas.
- Interior de vehículo: además de en la estructura del automóvil, los diferentes tejidos que componen los paneles de puertas y salpicadero donde se combina la tela con el plástico; la tela de los asientos y la espuma de su estructura o el aislante del techo con la tela decorativa.
- Mobiliario: de nuevo se presentan numerosos tipos de textiles entre el mobiliario de un hogar, donde el empleo del adhesivo puede suponer un importante ahorro de costes y además añadirle ventajas de resistencia, impermeabilidad, durabilidad, etc.



Ilustración 14: Adhesivo en calzado. [7; 14]

1.5 ESTADO ACTUAL.

Dado el amplio campo de uso que presenta este tipo de uniones, en los últimos años se han llevado a cabo diversas investigaciones con el objeto de lograr caracterizar lo mejor posible la relación adhesivo-adherente. No obstante, aún queda mucho trabajo que realizar, como se verá más adelante.

Como se explicaba anteriormente, el campo de aplicación de los adhesivos es muy amplio, esto se debe a que podemos encontrar características muy diferentes entre todas las variedades disponibles en el mercado. De esta forma podremos contar con un adhesivo rígido, con una buena función estructural, como expone (Chiminelli, A (2019)), una transferencia de cargas adecuadas, pero con un comportamiento frágil. Sin embargo, también existen adhesivos flexibles, donde la transmisión de cargas es mejor, la resistencia a los impactos y vibraciones mejora, es más dúctil.

La caracterización o estudio del comportamiento mecánico de un adhesivo es muy complejo, va a depender de diversos factores como: las condiciones ambientales, temperatura, la historia de cargas, la cantidad de deformación previa o el esfuerzo sometido. Además de esto, las distintas características que se le pueden dar en su elaboración aun lo hacen más complejo. Este hecho será el que nos mueva a realizar dicho trabajo, intentar aportar nuevos conocimientos con el fin de mejorar el entendimiento de estos materiales adhesivos.

1.6 CONCEPTOS TEÓRICOS BÁSICOS

Antes de poder comenzar con ninguna investigación, es necesario conocer algunos fundamentos teóricos que se van a ir desarrollando o tan solo mencionando en las diferentes lecturas y explicaciones. La teoría que se va a presentar principalmente para el estudio del comportamiento de las uniones adhesivas deriva de la teoría elástica, por lo que es conveniente recordar algunos conceptos de esta:

1.6.1. TENSIONES:

Las fuerzas que pueden aparecer sobre un cuerpo se van a dividir en fuerzas de volumen y fuerzas de superficie.

- Fuerzas de volumen: podrán actuar sobre el cuerpo sin la necesidad de tener contacto. Son por ejemplo la gravedad. En cuanto a la formulación:
 - Se define una unidad de volumen infinitesimal dV
 - La fuerza de volumen se expresará $\bar{\Phi}dV$, siendo $\bar{\Phi}$ el vector finito de la fuerza por unidad de volumen. Este vector varía con la posición en el sistema de referencia y también con el tiempo para la dinámica.
 - El vector de la fuerza resultante sobre el volumen quedará como la integral $\bar{\Psi} = \int_V \bar{\Phi}dV$.
 - Por último los momentos se expresarán de la forma $M_x = \iiint (yZ - zY)dx dy dz$.
- Fuerzas de superficie: si tienen que tener un contacto en el material, ya sea en el exterior o interior. La formulación se desarrolla como:
 - La unidad de superficie infinitesimal estará definida como dS
 - El vector unitario normal a la superficie será \bar{n} .
 - La fuerza que actúa sobre la superficie, normal a esta será $\bar{F}_n dS$, siendo \bar{F}_n el vector de fuerza unitaria que depende de la posición en el sistema de referencia y la orientación del vector \bar{n} . También dependerá del tiempo en la dinámica.

1.6.1.1. VECTOR DE TENSIÓN:

El vector de la fuerza superficial \vec{F}_n tendrá dos componentes, la tangencial τ_n que está aplicada sobre la cara superficial y la normal σ_n . De esta forma la fuerza en sus tres componentes escalares tendrá la forma $\vec{F}_n = (F_{nx}, F_{ny}, F_{nz})$ indicando el primer subíndice la dirección normal al área superficial y el segundo la dirección del valor escalar. La descomposición escalar quedará como:

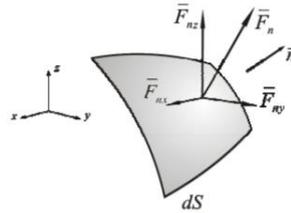


Ilustración 15: Descomposición de fuerzas. [27]

1.6.1.2. ESTADO DE TENSIÓN EN UN PUNTO

Cuando el vector normal coincide con cualquier eje de coordenadas (x, y, z), las coordenadas de la tensión se pueden expresar como:

$$F_{xx} = \sigma_x$$

$$F_{xy} = \tau_{xy}$$

$$F_{xz} = \tau_{xz}$$

En un punto P de un cuerpo, con un plano paralelo a cada eje de coordenadas, el vector de tensiones quedará como:

$$\begin{matrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{matrix}$$

1.6.2. DEFORMACIONES

La acción de las fuerzas provoca una deformación en los cuerpos elásticos, que no es otra cosa que el cambio de distancia entre dos puntos en el sólido. El vector que caracteriza este movimiento tendrá la forma (u, v, w) . En las deformaciones se distinguen dos teorías que se conocen como hipótesis de pequeñas deformaciones e hipótesis de grandes deformaciones.

1.6.2.1. PEQUEÑAS DEFORMACIONES:

Parte de la suposición de que las cargas que actúan sobre el cuerpo producen únicamente pequeños desplazamientos comparados con el tamaño del mismo, del orden de milímetros. Esta hipótesis o suposición es de gran importancia en el cálculo de estructuras pues permite realizar muchas simplificaciones en las ecuaciones del comportamiento. Se basa en un comportamiento del material elástico lineal, estableciendo así una relación entre el tensor de tensiones y el tensor de deformaciones de Cauchy (T_c)

- Tensor de Cauchy Green (T_c):

Permite conocer de manera exacta el estado de tensiones en el interior de un cuerpo. Este tensor es un vector de longitud unidad siempre perpendicular a la superficie n :

$$T^{(n)} = \sigma * n = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix}$$

Esta teoría está bastante extendida para describir las tensiones a las que es sometido un material elástico, donde representa las tensiones en la configuración deformada, la fuerza final aplicada respecto la configuración de deformación final. Sin embargo, en el caso de los materiales que no cumplen la condición de elasticidad lineal, este tensor no es del todo lo precisa que se necesitaría. Para grandes deformaciones, se empleará el término de tensor de tensiones de Piola-Kirchhoff.

Servirá para simplificar, por ejemplo la expresión de curvatura de una viga, considerar un comportamiento lineal y la superposición de cargas. Esta simplificación solo se podrá hacer cuando el error cometido por la simplificación sea admisible, por lo que dependerá de la importancia de la exactitud requerida, un orden de menos de un 1% suele ser aceptado.

La formulación para esta hipótesis se formula a partir de la representación de dos estados del material en el plano:

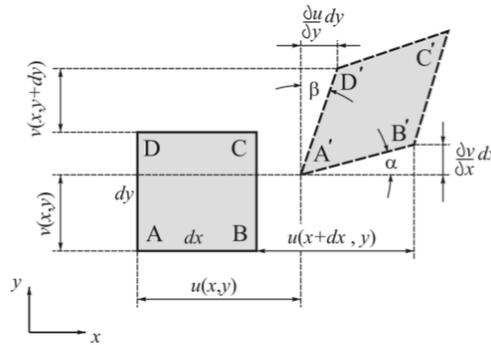


Ilustración 16: Deformación del plano. [27]

- La deformación en la dirección de x es $\epsilon_x = \frac{A'B' - AB}{AB}$, que se puede aproximar por medio de las pequeñas deformaciones a $\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$; $\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$; $\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$.
- Por otra parte, la distorsión del cuerpo se podrá expresar como $\gamma_{xy} = \frac{\pi}{2} - \widehat{A'B'C'} = \alpha + \beta$, siendo α y β los ángulos que para pequeñas deformación que serán igual a la tangente del mismo. También se podrá expresar la distorsión como parámetros de deformación $\gamma_{xy} = \frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx}{dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx} + \frac{\frac{\partial u}{\partial y} dy}{dy + \frac{\partial v}{\partial y} dy}$,
- De forma análoga para el resto de planos y con la hipótesis de pequeñas deformaciones, quedarán de la forma $\gamma_{xy} = \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$; $\gamma_{yz} = \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)$; $\gamma_{xz} = \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$

1.6.2.2. GRANDES DEFORMACIONES

Al contrario que en el caso anterior, cuando el material presenta una deformación muy grande y por tanto un gran desplazamiento, todas las hipótesis del caso anterior no son válidas. El comportamiento del material se hace más complejo por ser ahora de tipo no lineal, por lo que las ecuaciones de equilibrio y los tensores deberán estar referidos al estado deformado, empleado para ello el tensor de Piola-Kirchoff en lugar de Cauchy.

- Tensor de Piola-Kirchoff (T_R):

Tendrá en mismo uso que el tensor anterior, pero presenta la diferencia que la tensión está representado con respecto a la forma inicial sin deformar. En este caso concreto, se podrá establecer una relación entre ambos conceptos, teniendo en cuenta que en el de Piola-Kirchoff cuenta con dos tensores diferentes:

- Primer Tensor de Piola-Krichhoff: tensor mixto que relaciona el estado inicial sin deformar con las tensiones en el estado deformado. Se establece la relación como:

$$T_R(X) = J * T_c(x) * F^{-T}$$

Donde F hace referencia al gradiente de deformación que se introduce en el tensor de Piola, relacionado el estado de deformación final con el inicial $F = \frac{\partial x_i}{\partial X_j}$, donde x son las coordenadas de la configuración inicial y X las de la final. El valor de J representa el determinante del gradiente F.

- Segundo tensor de Piola-Krichhoff: tensor simétrico para plantear problemas sobre estado inicial.

$$S_R(X) = J * F^{-1} * T_c(x) * F^{-T}$$

Como se expresa en el libro (Hackett, R. M. (2018)) este segundo tensor con la formulación Lagrangiana es el más empleado para medir la deformación:

$$S_{IJ} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial E_{IJ}} + \frac{\partial W}{\partial E_{JI}} \right)$$

El operador O_{IJ} que se puede manipular para la diferencial, son igual a $\frac{\partial}{\partial C_{IJ}} + \frac{\partial}{\partial C_{JI}}$ que si se implementa en la expresión anterior tendremos:

$$S_{IJ} = C_{10}(\bar{I}_1)_{IJ}^* + C_{01}(\bar{I}_2)_{IJ}^* + 2D_1(J - 1)(J)_{IJ}^*$$

Donde las variables $(\bar{I}_1)_{IJ}^*$ y $(\bar{I}_2)_{IJ}^*$ son expresadas como:

$$(\bar{I}_1)_{IJ}^* = (I_3)^{-1/3} (I_1)_{IJ}^* - \frac{1}{3} \left(I_1 I_3^{-\frac{4}{3}} \right) (I_3)_{IJ}^*$$

$$(\bar{I}_2)_{IJ}^* = (I_3)^{-2/3} (I_2)_{IJ}^* - \frac{2}{3} \left(I_2 I_3^{-\frac{5}{3}} \right) (I_3)_{IJ}^*$$

$$(J)_{IJ}^* = \frac{1}{2} (I_3)^{-\frac{1}{2}} (I_3)_{IJ}^*$$

$$(I_1)_{IJ}^* = 2\delta_{IJ}$$

$$(I_2)_{IJ}^* = 2I_1 \delta_{IJ} - (C_{IJ} + C_{JI})$$

$$(I_3)_{IJ}^* = I_3 (C_{IJ}^{-1} + C_{JI}^{-1})$$

Este tensor se podrá expresar de forma equivalente al de Cauchy de forma:

$$t_{ij} = \frac{1}{J} F_{iK} S_{KL} F_{jL} \text{ o bien } t = \frac{1}{J} F S F^T$$

Donde sabemos que t_{ij} es el tensor de Cauchy, podemos escribir de la forma:

$$P_{ij} = F_{iK} S_{KL} \text{ o bien } P = F S$$

Donde P es el primer tensor de Piola.

1.7 OBJETIVO.

El problema principal que presentan las uniones llevadas a cabo con materiales adhesivos reside en la complejidad de su caracterización. Mientras que otros métodos como las uniones mecánicas o la soldadura se pueden caracterizar sabiendo factores como el material, sus dimensiones y el uso el elemento de unión, el material adhesivo, como se ha expuesto anteriormente, presenta una mayor sensibilidad a los factores, tanto externos como intrínsecos de la unión, por lo que la caracterización de sus propiedades con un ensayo, para posteriormente extenderlo a los cálculos de cualquier unión se torna mucho más complejo.

Debido a todos estas variables que van a influir en la capacidad de unión del adhesivo, se hace imprescindible realizar una serie de ensayos para caracterizar cada tipo de unión que se va a emplear, siempre intentando replicar las características de su funcionamiento en la vida útil lo mejor posible.

Este trabajo tiene el objeto de poder realizar la caracterización de una serie de adhesivos con comportamiento hiperelástico mediante ensayos de laboratorio. Antes de poder llevarlos a cabo, es necesario un proceso de investigación acerca de los métodos ya existentes, de pruebas realizadas con anterioridad, así como diferentes puntos de vista de distintos autores. De este modo se obtendrá una visión global del estado actual del campo de las uniones adhesivas y su caracterización, además, podremos elegir aquellos métodos que resulten más adecuados para nuestros adhesivos. Una vez se hayan elegido los métodos correspondientes, se deberá elaborar un plan de ensayo para llevarlos a cabo en el laboratorio, esto es, adaptar las pruebas a los materiales y condiciones concretas que se disponen en el lugar de realización del ensayo, se debe buscar que los pruebas que llevemos acabo sean lo más reproducibles posible. Junto con esta adaptación se incorporará el diseño de todos aquellos utillajes que se puedan necesitar para realizar los ensayos o preparar las máquinas que se disponen.

2. COMPORTAMIENTO DE LOS ADHESIVOS

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.1. INTRODUCCIÓN: TEORÍA DEL COMPORTAMIENTO ELÁSTICO, PLÁSTICO O VISCO-ELÁSTICO:

Como se expone en [9] tendremos:

- Comportamiento elástico:

Se da cuando el sólido es capaz de recuperar la forma inicial tras la descarga. Se establece una relación única directa entre el tensor de tensiones y el de deformaciones. Además existirá una relación lineal entre las componentes de tensión y deformación, obteniendo una expresión de la relación como:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}$$

Donde el coeficiente C_{ijkl} es una constante para expresar el tensor de orden cuarto y ϵ_{kl} el tensor de deformación. Para el caso de un comportamiento elástico pero no lineal el coeficiente del tensor estaría expresado en función del tensor de deformaciones o tensiones.

La representación del diagrama tensión-deformación tendrá la forma:

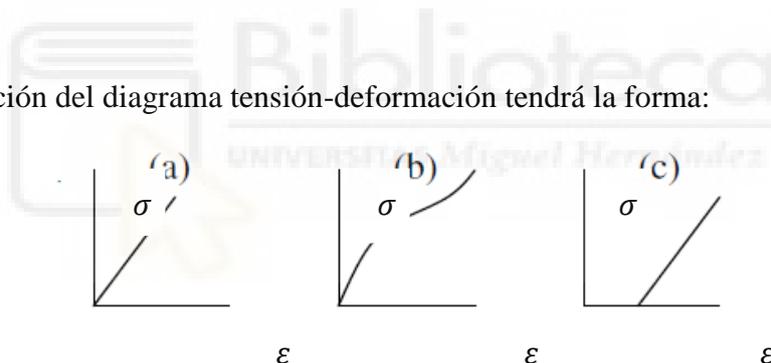


Ilustración 17: Diagramas de tensión-deformación: elástico, hiperelástico, viscoelástico. [9]

- Comportamiento visco-elástico:

Cuando la respuesta del material ante la descarga no es instantánea se dice que tiene un comportamiento visco-elástico. Como el tiempo necesario para recuperar las condiciones iniciales puede ser realmente elevado, en este tipo de materiales la deformación no solo depende de la carga, sino también de la historia de cargas, siendo otro parámetro importante a tener en cuenta. Más adelante veremos los efectos de esta viscosidad en el material. Este tipo de comportamiento será también útil para comprender el funcionamiento ante una carga cíclica, permitiendo determinar la energía disipada en la deformación.

- Comportamiento plástico:

Será cuando el material presente alguna deformación no recuperable tras la descarga. Los materiales suelen partir de un comportamiento elástico para pequeñas cargas o deformaciones, pero alcanzan la plasticidad en un determinado valor, donde tiene lugar una transición viscosa entre elástico y plástico. En un comportamiento plástico ideal, el material comienza la deformación de manera elástica, pero alcanza el valor de la carga crítica, donde se comienza a deformar de manera plástica mientras la carga se mantenga en este valor, cuando cese habrá una recuperación de la deformación elástica pero no de la plástica, sin embargo, lo más habitual entre materiales reales tiene lugar un endurecimiento con la deformación plástica, lo que provoca un aumento del límite elástico. Para el caso de someterse a una carga cíclica, el límite elástico se hará cada vez mayor debido a este endurecimiento.

2.1.2. COMPORTAMIENTO DE ADHESIVOS HIPERELÁSTICOS:

Una vez introducidos los diferentes comportamientos que se dan en un material sometido a tensiones y deformaciones, vamos a estudiar el caso concreto de los adhesivos, en concreto de los hiperelásticos, que serán los que se analicen en este trabajo.

2.1.2.1. INTRODUCCIÓN:

Como ya se mencionaba anteriormente, existen tres clasificaciones para la estructura de los polímeros tras el curado, y por tanto, de adhesivos que se pueden encontrar. En muchas ocasiones, los materiales hiperelásticos se encuentran bastante afines a los polímeros de tipo elastómero. Esta clasificación de material se caracteriza por estar compuesto por una serie de cadenas unidas con enlaces químicos que forman en una estructura reticulada. Sus principales características que los diferencian de las otras familias son las altas elongaciones, la flexibilidad y el bajo módulo elástico. Además, algunos pueden llegar a presentar comportamientos más cercanos al termostables (no se deforman con el calor) o a los termoplásticos (se deforman con el calor). Los elastómeros son capaces de sufrir grandes elongaciones con una carga relativamente pequeña, llegando a alargamientos de entre un 200% y un 1000% su longitud inicial, sin liberar, como otros materiales, gran cantidad de energía en el proceso.

Sin embargo, no siempre podremos estudiar un material hiperelástico como elastómero, como se ha visto en la bibliografía, el comportamiento de este nuevo material es mucho más complejo. Se debe a que sus deformaciones no tienen un comportamiento lineal con respecto a la carga o la tensión que las genera, el comportamiento no lineal es lo que hace tan complejo el estudio del comportamiento de este tipo de materiales.

2.1.2.2. COMPORTAMIENTO LINEAL:

En la ciencia de materiales la caracterización de los materiales a partir de su diagrama de tensión-deformación es muy habitual debido a las propiedades que se pueden extraer de este: modulo de Young, modulo de cortadura, coeficiente de Poisson, etc. En los materiales que el comportamiento es lineal existe una relación o una función capaz de relacionar la tensión para una deformación, este es el caso, por ejemplo, de los materiales elásticos. Por esto, de manera convencional el cálculo para diseñar cualquier estructura estará basado en un comportamiento lineal de la misma.

2.1.2.3. COMPORTAMIENTO NO LINEAL:

Al contrario que antes, las dificultades que presenta un comportamiento de este tipo es que no es posible definir una función o una expresión que sea capaz de relacionar de manera directa la tensión con la deformación, a diferencia del comportamiento elástico, a este tipo de materiales se le conoce como materiales hiperelásticos.

- Comportamiento hiperelásticos:

Existen algunos materiales, como es el caso de elastómeros, polímeros, neumáticos o incluso materiales biológicos, en los cuales no existe un comportamiento elástico lineal, la relación entre la carga y la elongación no es lineal, sino que la deformación varía en función de la cantidad de carga que se le este aplicando. De esta forma, su curva de tensión deformación no es una recta como para un material elástico, sino que se compone de distintos tramos, como se mostraba con la (Figura 18) en (Canseco de la Cruz, R. A (2011)):

- En las pequeñas deformaciones se comportará como un material elástico clásico, de manera lineal.
- A partir de una deformación dada, abandona la hipótesis de pequeñas deformaciones y se vuelve no lineal. La pendiente de la curva se aplana y podrá deformarse en gran medida con poco aumento de la tensión.
- Finalmente, la pendiente vuelve a crecer aumentando rápidamente la tensión.

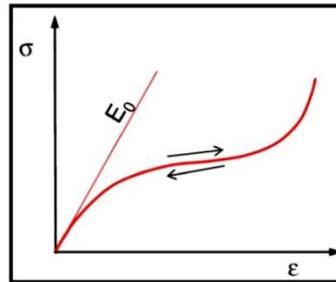


Ilustración 18: Diagramas de tensión-deformación hiperelástico. Canseco de la Cruz, R. A (2011)

Sabiendo esto, tendremos que los adhesivos que presenten un comportamiento hiperelástico no se dará en todo su espectro de elongación, cada uno a partir de cierto grado de estiramiento comienza a pasar del estado lineal al no lineal. Este punto será en muchas ocasiones de bastante interés a la hora de caracterizar su comportamiento.

Diagrama de tensión-deformación hiperelástico:

La caracterización de los materiales hiperelásticos se suelen describir por medio de la función de densidad de energía de deformación (W), esta función actúa como potencial de las tensiones. A diferencia de un material elástico, donde existe una función que es capaz de relacionar las tensiones con las deformaciones de manera lineal.

Elástico:

$$\sigma = F(\epsilon)$$

Hiperelástico:

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \epsilon}$$

La función de densidad de energía de deformación $W(\epsilon)$ en el comportamiento hiperelástico es una función potencial de las variables cinemáticas (deformación ϵ), cuya derivada serán las variables estáticas (tensiones σ). Por tanto, la integral de la función $W(\epsilon)$ en el volumen del cuerpo, proporcionará la energía de deformación (U), mientras que su derivada dará las componentes de tensión. Además, la función de densidad de energía de deformación será la integral bajo la curva de la ley de tensión-deformación:

$$U = \int_V W(\epsilon) \, dV$$

$$W(\epsilon) = \int_0^\epsilon W(\epsilon) = \int_0^\epsilon \frac{\partial W}{\partial \epsilon} : d\epsilon = \int_0^\epsilon \sigma : d\epsilon$$

Tensores de deformación:

Si lo queremos expresar por medio de los tensores de deformación, en el artículo (Bonet, J(1997)), tendremos que, para el caso del comportamiento elástico, se hará uso del gradiente F de Cauchy, sin embargo, para el caso de hiperelasticidad se combina el tensor F(X) con el primer tensor de Piola Krichhoff (P):

$$P = P(F(X), X)$$

Para el caso de los materiales hiperelásticos el trabajo que se describe durante el proceso de deformación únicamente depende del estado inicial y de la configuración final. Siguiendo esta definición del primer tensor de Piola, podemos expresar la energía de deformación almacenada o potencial elástico de la deformación por unidad de volumen (ψ), como el trabajo realizado por la tensión desde la posición inicial hasta la final:

$$\psi(F(X), X) = \int_{t_0}^t P(F(X), X) : \dot{F} \, dt \quad \dot{\psi} = P : \dot{F}$$

Mediante ensayos experimentales es posible obtener $\psi(F, X)$ y obtener de manera alternativa $\dot{\psi}$ como $\dot{\psi} = \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial \psi}{\partial F_{ij}}$, lo que permite expresar el tensor como:

$$P(F(X), X) = \frac{\partial \psi(F(X), X)}{\partial F}$$

Finalmente, otra forma también empleada para expresar esta energía es en función de $C = F^T F$, el tensor derecho de Cauchy:

$$\psi(F(X), X) = \psi(C(X), X)$$

Como $\frac{1}{2} \dot{C} = \dot{E}$ es el trabajo conjugado del segundo tensor de Piola (S), también se podrá expresar la ecuación de forma lagrangiana con este:

$$\dot{\psi} = \frac{\partial \psi}{\partial C} : \dot{C} = \frac{1}{2} S : \dot{C} \quad S(C(X), X) = 2 \frac{\partial \psi}{\partial C} = \frac{\partial \psi}{\partial E}$$

Trabajo:

Como se exponía anteriormente, los adhesivos que se van a estudiar en este trabajo presenta un comportamiento conocido como hiperelástico. Se habla que su

estado tensional σ derivaba de una función de energía elástica o energía almacenada, la cual conoceremos como W y está definida por unidad de volumen: $\sigma = \frac{\partial W(\varepsilon)}{\partial \varepsilon}$.

El trabajo mecánico interno que tiene lugar en un material hiperelástico por el desarrollo de las tensiones entre dos estados de deformación se puede expresar como:

$$\int_{t_1}^{t_2} \sigma(\varepsilon): \varepsilon dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial W(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} : d\varepsilon = \int_{t_1}^{t_2} dW(\varepsilon): d\varepsilon = W(\varepsilon_2) - W(\varepsilon_1)$$

- Comportamiento viscoso:

Al igual que la teoría elástica clásica se basa en la ley de Hooke con una deformación proporcional al esfuerzo, la teoría hidrodinámica trata las propiedades de los líquidos por la ley de Newton, esfuerzo aplicado proporcional a la velocidad de la deformación. Sin embargo, en los materiales reales estas condiciones no están siempre presentes de manera exacta, sino que existe un punto intermedio donde ambas tienen lugar. A pesar de que la viscosidad es un concepto asociado al estado líquido, debido a la resistencia que presentan a fluir y deformarse, en algunos de los adhesivos, especialmente los termoplásticos, este efecto también estará presente, dado que no siempre tienen que encontrarse con una rigidez extrema.

- Comportamiento visco-elástico:

El efecto que tiene la presencia del comportamiento viscoso en los polímeros o adhesivos recibe el nombre de visco-elasticidad. De esta forma se muestra tanto en Calabuig, J. M (2017b) como en el documento [29] que se dará la combinación de un comportamiento puramente elástico junto con la influencia de la viscosidad, de forma que para un esfuerzo aplicado, tras el cese solo parte de la deformación es recuperada de manera inmediata.

Este comportamiento está estrechamente ligado con la temperatura del material en cada instante. Los polímeros elastómeros principalmente se ven muy influenciados debido mayoritariamente a los enlaces de Van der Waals que ocurren en el material.

Existen varias temperaturas que marcan el comportamiento de estos elastómeros, que se podrán dividir como se ve en el documento [28] en:

- Temperatura de transición vítrea: por debajo de esta temperatura el polímero se encuentra en un estado de cristalización, se volverá muy rígido y frágil.
- Temperatura de fusión: temperatura por encima de la cual las fuerzas entre los enlaces se vuelven muy débiles y se convierte en líquido.

- Temperatura de degradación: a altas temperaturas, cuando ya se encuentra en estado líquido, el material comenzará a degradarse conforme continúe aumentando la temperatura.

De esta forma tendremos que para temperaturas por debajo de la temperatura de transición vítrea, los cambios en las condiciones de medida no serán muy relevantes. De igual modo, a altas temperaturas, donde comienza la degradación, el efecto de la viscosidad es muy reducido, ya que apenas quedarán enlaces entre las cadenas poliméricas. Tendremos de este modo, que entre la temperatura de transición vítrea y la de fusión es cuando el efecto de la viscosidad afecta a nuestro adhesivo, es aquí donde se encuentra la visco-elasticidad del material.

- Formulación con viscoelasticidad

La función potencial de energía de deformaciones que describen los materiales hiperelásticos $U(F)$, que se define en el documento [25] como la expresión que determina la energía de deformación almacenada en un volumen, para el caso de los materiales con comportamiento visco-elástico, esta energía se podrá descomponer en dos partes, una parte elástica y otra viscosa, lo que genera que ante una carga desarrolle una deformación inmediata y otra dependiente del tiempo, en el caso de la carga se continúe constante en el tiempo. Estas dos componentes reciben el nombre de energía desviadora y energía volumétrica.

$$U = U_{dev} + U_{vol}$$

De esta forma quedará recogida tanto la energía de cambio de forma, como la que se pierde en los efectos visco-elásticos. Como hemos visto, para la parte elástica la explicación más empleada es mediante la ley de Hooke, únicamente con la tensión y la deformación. Sin embargo, para el caso de la parte viscosa, la respuesta depende también del tiempo y no es reversible. El comportamiento de esta parte del material se suele desarrollar a partir de la ley de Newton, donde la tensión ahora es proporcional a la velocidad de deformación. Existen diferentes modelos para explicar este comportamiento combinado, se pueden clasificar de la siguiente manera, como en el artículo (Calabuig, J. M (2017b)):

- Maxwell: combinación en línea de dos elementos, uno elástico y otro viscoso. Con la fuerza aplicada la parte elástica se deformará de manera instantánea mientras que la plástica se irá incrementando con el paso del tiempo, la deformación total será la suma de estos dos efectos.

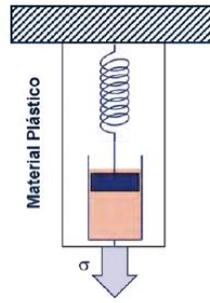


Ilustración 19: Esquema modelo visco-elástico de Maxwell. Masoliver i Marcos, G (2017)

- Kelvin-Voigt: se representa como dos elementos en paralelo, de tal forma que ante una tensión, parte de ella se almacenará como energía en la parte elástica, mientras que otra se disipa en la viscosa, por lo que al cesar la carga, solo se podrá recuperar la primera.

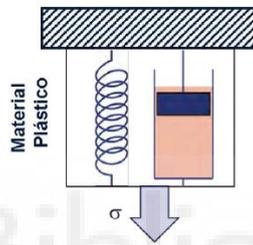


Ilustración 20: Esquema modelo visco-elástico de Kelvin-Voigt. Masoliver i Marcos, G (2017)

- Modelo de Burgers: es la combinación de los dos anteriores para solucionar los inconvenientes que se derivan de los mismos. En el caso de Maxwell no se ajusta a la realidad de la fluencia con el tiempo, mientras que Kelvin-Voigt no es capaz de explicar el comportamiento inicial correctamente. De esta forma se tendrá que la deformación total es la suma de las de los dos autores primeros:

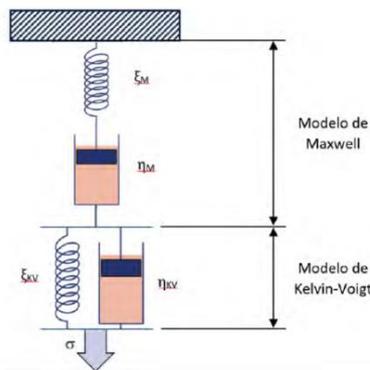


Ilustración 21: Esquema modelo visco-elástico de Burges. Masoliver i Marcos, G (2017)

El carácter visco-elástico genera una serie de efectos sobre su comportamiento como son: la histéresis, el efecto Mullins o la relajación de la tensión a deformación constante.

○ Efecto Mullins:

Esta propiedad que presentan ciertos materiales elastómeros fue descubierta por Leonard Mullins en 1947 y por eso se le dio este nombre. Lo que describe este efecto es el cambio de las propiedades mecánicas del material tras ser sometido a ciclos de carga y descarga. Esta modificación de las propiedades se debe a un reblandamiento del material debido a cada ciclo en el cual se ha excedido de la carga máxima alcanzada en el anterior, el material presenta una especie de memoria selectiva, como se expone en (Zúñiga, A (2006)). Esto causa que para cada ciclo que exceda de la carga posteriormente aplicada, presente una curva de tensión-deformación distinta, requiriendo cada vez menos tensión para generar la misma deformación.

Desde un punto de vista de la composición interna del material, el efecto no está del todo claro, la principal teoría dice que se debe a la pérdida de las uniones entre moléculas. Esta rotura va a suponer una pérdida de energía de deformación en energía calorífica, conocido como histéresis, dejando al material con una menor energía necesaria para la siguiente deformación.

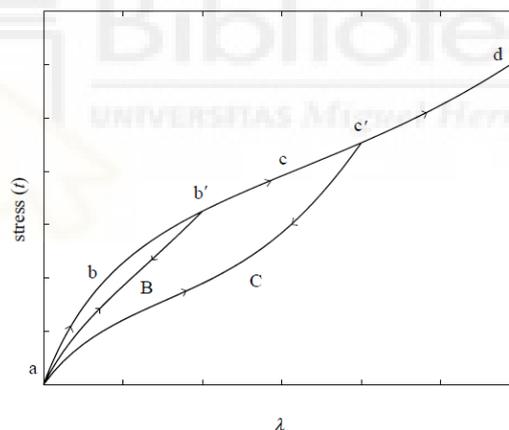


Ilustración 22: Diagrama con tensión-deformación con efecto Mullins. Ogden, R. W (1999)

○ Efecto de histéresis y resiliencia:

En los materiales elastómeros que están sometidos a una carga cíclica, la resiliencia es la relación que existe entre la energía suministrada para producir la deformación y la energía recuperada tras el cese de este. La diferencia entre estas dos magnitudes recibe el nombre de histéresis, la energía perdida en un ciclo de deformación. Los mecanismos más importantes que generan esta pérdida de energía o histéresis son:

-Fricción interna: debido a la viscosidad interna del material, las moléculas tendrán una fricción entre ellas durante la deformación. Depende por consiguiente de la temperatura

y la rigidez del material, siendo para materiales blandos y en altas temperaturas, más acusado.

-Cristalización por la deformación: las grandes deformaciones generan fusión del material generando zonas cristalinas.

-Ablandamiento: es la pérdida de rigidez del material por el cambio en los enlaces entre moléculas, es conocido como efecto Mullins. El ablandamiento depende de la historia de cargas, pues es insensible para deformaciones inferiores a la carga anterior.

-Rotura estructural: la pérdida de los enlaces entre las partículas que hacen desaparecer la estructura reticulada.

-Deformación de dominios: por la presencia de una inclusión se forman deformaciones permanentes con alta histéresis

Todos estos fenómenos provocan una pérdida de la energía mecánica en la recuperación de la deformación, teniendo una representación en el diagrama de tensión-deformación.

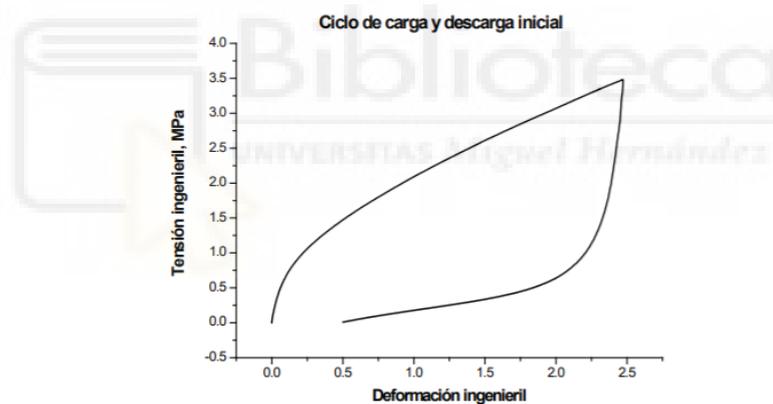


Ilustración 23: Diagrama tensión-deformación de ciclo de carga y descarga para elastómero a tracción. [16]

- Formulación de no linealidad:

En el documento (Arana, J. L (s.f)) se expone una extensa formulación acerca del comportamiento no lineal de los elastómeros. Si bien no es sencilla de comprender, servirá para entender muchos de los artículos que se van a revisar en este trabajo. Se va a realizar una construcción desde a la ecuación más básica hasta la compresibilidad del material.

La ecuación básica para desarrollar la teoría no lineal parte del gradiente de tensor de deformación $F = \frac{\partial x}{\partial X}$ siendo X la posición inicial y x la posición final, dada por $x = \chi(X, t)$. Por otro lado, la ecuación de balance de momentos quedará como $div\sigma + b =$

ρa y $\sigma = \sigma^T$ el operador de divergencia se calculará con respecto a las coordenadas deformadas (x), σ es el tensor de Cauchy, b la fuerza por unidad de volumen en el cuerpo y ρ y a serán la densidad y el vector aceleración.

El balance de momentos en la superficie del cuerpo será $\sigma n = \bar{t}$ siendo \bar{t} el vector de tracción por unidad de área superficial con dirección normal hacia afuera n . Siendo esta expresión equivalente a $x = \bar{x}$. Las condiciones iniciales para la formulación son $x(t = 0) = x_0$ y $v(t = 0) = v_0$.

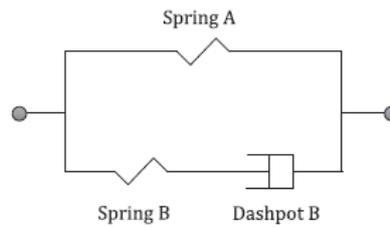


Ilustración 24: Diagrama muelle amortiguador. Aranda-Iglesias, D (2017)

El modelo constitutivo que se desarrolla a partir de este punto para la densidad de energía de deformación basándose en las investigaciones de Volokh (Volokh, K. (2013)) para describir la visco-elasticidad isotrópica con un límite energético. De esta forma tendremos la expresión:

$$\psi(B, B_B, \xi) = \psi_A(B, \xi) + \psi_B(B_B, \xi)$$

Donde ψ_A es la función de energía de deformación del resorte que caracteriza el equilibrio termodinámico del elastómero, mientras que ψ_B es la función de energía de deformación del resorte para la energía adicional y el estado no lineal. Las variables $B = FF^T$ es el tensor de tensiones de Cauchy izquierdo, B_B es la variable interna del modelo y ξ es el parámetro de cambio.

Se imponen las condiciones sobre la energía de deformación de resorte A:

$$\psi_A(B, \xi) = \psi_A^f - H(\xi)\psi_A^e(B)$$

Donde $\psi_A^f = \psi_A^e(1)$ y cuando $\|B\| \rightarrow \infty$ $\psi_A^e(B) = 0$ definen las constantes de energía de fallo en masa y la energía elástica libre del resorte respectivamente. $H(\xi)$ es una función de paso unitario, es decir $H(z) = 0$ si $z < 0$ y $H(z) = 1$ en el resto. Por último ξ es un parámetro entre $(-\infty, 0]$ y se define con la ecuación:

$$\xi = -H\left(\varepsilon - \frac{\psi_A^e}{\psi_A^f}\right), \xi(t = 0) = 0$$

De esta formulación se deduce que la energía de deformación del muelle será elástica siempre que se encuentre por debajo del límite de ψ_A^f y una vez que lo supere se mantiene constante, la el parámetro ξ no es una variable interna del material, sino un interruptor como en el daño mecánico, $\xi = 0$ para elástico y $\xi < 0$ cuando se da la disipación. Para el límite de la energía elástica se emplea la expresión:

$$\psi_A^e(B) = \frac{\Phi}{m} \Gamma\left(\frac{1}{m}, \frac{\psi_A(B)^m}{\Phi^m}\right)$$

Las variables de esta expresión se establecen como $\Gamma(s, x) = \int_x^\infty t^{s-1} e^{-t} dt$, $\psi_A(B)$ es la energía del material intacto, Φ es el límite de la energía y m es el parámetro de control de la agudeza. A partir de esta, la energía de fallo se podrá describir como:

$$= \psi_A^f = \psi_A^e(1) = \frac{\Phi}{m} \Gamma\left(\frac{1}{m}, \frac{\psi_A(1)^m}{\Phi^m}\right)$$

Siendo una expresión que depende de los parámetros Φ y m .

Con respecto al resorte B no será necesario la limitación de la energía siempre que la de A lleve a la falla general. Esta expresión se desarrolla como:

$$\psi_B(B_B, \xi) = H(\xi) W_B(B_B)$$

La variable $W_B(B_B)$ representa la energía de deformación sin falla, junto con W_A servirán para describir el comportamiento del material antes del fallo.

Por otra parte, el tensor de Cauchy vendrá dado por la suma $\sigma = \sigma_A + \sigma_B$ donde:

$$\sigma_A = 2I_3^{-1/2} \frac{\partial \psi_A}{\partial B} B = 2I_3^{-\frac{1}{2}} (I_3 \psi_A 1 + (\psi_1 + I_1 \psi_2) B - \psi_2 B^2)$$

$$\sigma_B = 2I_{B3}^{-\frac{1}{2}} \frac{\partial \psi_B}{\partial B_B} B_B = 2I_{B3}^{-\frac{1}{2}} (I_{B3} \psi_{B3} 1 + (\psi_{B1} + I_{B1} \psi_{B2}) B_B - \psi_{B2} B_B^2)$$

De esta forma, los invariantes principales quedan definidos como: $I_1 = tr B$, $2I_2 = (tr B)^2 - tr(B^2)$, $I_3 = det B$ y $I_{B1} = tr B_B$, $2I_{B2} = (tr B_B)^2 - tr(B_B^2)$, $I_{B3} = det B_B$.

Por otra parte, se emplea la notación $\psi_i = \partial \psi / \partial I_i$ y $\psi_{Bi} = \partial \psi / \partial I_{Bi}$.

Otra forma para expresar σ_B en función de la tasa de tensor de deformación D_B es $\sigma_B = \beta_1 1 + \beta_2 D_B + \beta_3 D_B^2$ pudiendo establecer una relación entre D_B y B_B por medio de la expresión $\overset{\nabla}{B}_B + D_B B_B + B_B D_B = 0$ con $B_B(t=0) = 1$. La variable $\overset{\nabla}{B}_B = \dot{B}_B - L B_B - B_B L^T$, siendo L el tensor del gradiente de velocidad.

I. Formulación para incompresibilidad

Para el caso del material incompresible tendremos la simplificación de $det B = 1$, $det B_B = 1$ y $tr D_B = 0$. Quedando de esta forma las expresiones de tensores como:

$$\sigma_A = -p_A 1 + 2(\psi_1 + I_1 \psi_2) B - 2\psi_2 B^2$$

$$\sigma_B = -p_B 1 + 2(\psi_{B1} + I_{B1} \psi_{B2}) B_B - 2\psi_{B2} B_B^2$$

Con p_B y p_A como multiplicadores de Lagrange. Si tomamos $\beta_1 = \frac{1}{3} tr \sigma_B$, $\beta_2 = \eta_2$ y $\beta_3 = 0$ podremos expresar el tensor σ como:

$$\sigma_B = \frac{1}{3} (tr \sigma_B) 1 + \eta_2 D_B$$

II. Formulación para compresibilidad

En el caso de contar con compresibilidad, las expresiones para los tensores quedarán de la forma:

$$\sigma_A = 2I_3^{-\frac{1}{2}} ((I_3 a - b) 1 + (\psi_1 + I_1 \psi_2) B - \psi_2 B^2)$$

$$\sigma_B = 2I_{B3}^{-\frac{1}{2}} ((I_{B3} a_B - b_B) 1 + (\psi_{B1} + I_{B1} \psi_{B2}) B_B - \psi_{B2} B_B^2)$$

Siendo las variables a , b y a_B , b_B las incidencias sobre el módulo de compresibilidad. Como los módulos de compresibilidad o masa no son independientes deben darse las condiciones de tensión cero para que $B = B_B = 1$ y $D = 0$. De esta forma quedará como $0 = a - b + \psi_1 + 2\psi_2$ y $0 = a_B - b_B + \psi_{B1} + 2\psi_{B2}$ quedando como $a \simeq b \gg \psi_1 + 2\psi_2$ y $a_B \simeq b_B \gg \psi_{B1} + 2\psi_{B2}$. Siguiendo a Reese and Govindecjee se escribe la ley constitutiva de

$$\beta_1 = \frac{3\eta_1 - 2\eta_2}{9\eta_1} tr \sigma_B, \beta_2 = \eta_2, \beta_3 = 0$$

Donde η_1 y η_2 son los dos parámetros de viscosidad. Esta expresión permite obtener σ_B como:

$$\sigma_B = \frac{3\eta_1 - 2\eta_2}{9\eta_1} (tr \sigma_B) 1 + \eta_2 D_B$$

2.2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

2.2.1. INTRODUCCIÓN:

Justificación de la bibliografía elegida: teniendo en cuenta que en este trabajo se va a tratar con un material de carácter hiperelástico, se ha seleccionado una serie de artículos, información bibliográfica y trabajos previos, para ver el estado en el que se encuentra este conocimiento en la actualidad. Se han buscado trabajos donde se emplean adhesivos flexibles, hiperelásticos, con efectos de viscosidad, además, debido a la gran similitud con algunos comportamientos de elastómeros, se han revisado trabajos acerca de gomas, caucho, banda de rodadura en neumáticos. En la extensa revisión se han encontrado desde trabajos únicamente centrados en alguna de esta propiedad, como otros mucho más en línea con la realización del presente trabajo. El fin será investigar acerca de la caracterización mecánica y de rotura.

La caracterización mecánica nos permite conocer una serie de propiedades mecánicas del material para poder entender su comportamiento. Como se expone en (Charlton, D. J (1994)), existen dos vertientes a la hora de llevar a cabo esta tarea:

- Basados en la termodinámica estadística: trata de observar la fuerza elástica de las gomas que surgen de la pérdida de entropía con el aumento de la extensión, dado que la estructura de los cauchos está muy ordenada y por tanto con alta entropía. Será empleada asimismo una distribución estadísticas de la longitud, orientaciones y estructura de las moléculas, pero se muestra inapropiada para esfuerzos moderados, por encima de 50% de deformación.
- Basado en enfoque fenomenológico: donde se observa el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de esfuerzos.

En el caso de los adhesivos hiperelásticos, la experiencia observada en la bibliografía nos hará centrarnos en el modelo de estudio fenomenológico. Se ha recopilado una serie de parámetros más empleados en este caso que son: el módulo de Young o módulo de elasticidad (E), el coeficiente de Poisson (ν), el módulo de cortadura (G) y el módulo de material en masa (k), también conocido módulo de compresibilidad. Existen distintas pruebas que van a ser analizadas para determinar, en función del parámetro que se pretenda obtener, cual resulta más apropiada, siempre teniendo en cuenta que se trata de un adhesivo y no de cualquier otro material. En estos ensayos se realizan distintos procedimientos, como se verá más adelante, donde el material es sometido a una serie de esfuerzos para estudiar su respuesta, algunos autores

explican que, es posible la caracterización con una única dirección de ensayo como en el trabajo (Dispersyn, J (2017)), pero se obtendrán mejores resultados con la combinación de varias como en (Amstutz, C (2018)).

Los ensayos para la caracterización pueden elaborarse desde dos perspectivas: mediante el adhesivo en masa o por medio de probetas simulando las características de uso. Ambos serán reflejados en (Duncan, B (2001)):

- Ensayos en masa: para la determinación de las propiedades del material, los ensayos en masa son más convenientes por el hecho de lograr una distribución de tensiones conocida y más uniforme, sin depender de las características del adherente, además la preparación es mucho más simple y rápida.
- Ensayos en condición de uso: debido a la gran dependencia que presentan los adhesivos de las condiciones de desarrollo de la unión: temperatura y tiempo de curado, longitud de solape, espesor del material o la adhesión entre sustrato y adhesivo; sumado además a las características del adherente. Los ensayos de este tipo permiten conocer de una forma más exacta las condiciones reales cuando el adhesivo vaya a ser empleado, a pesar de ser más complejos de realizar y necesitar una mayor cantidad de pruebas para ello, el resultado es mucho más fiel a la realidad.

Por ello para la determinación de parámetros del material como el módulo de Young, coeficiente de Poisson, el módulo de compresibilidad o de cortadura, los ensayos suelen ser con material en masa, sin embargo, como veremos más adelante, cuando se trata de la obtención de la densidad de energía o la energía de rotura, las probetas específicas para simular cada tipo de uso serán más convenientes.

2.2.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS:

2.2.2.1. MÓDULO DE YOUNG:

El Módulo de Young (E) es un parámetro que se emplea para caracterizar el comportamiento de los materiales. Se desarrolla a partir de la Ley de Hook, estableciendo una relación entre la deformación asociada a un esfuerzo, este cociente es el que determina la rigidez de dicho material y se calcula a partir del diagrama de tensión-deformación, mediante la expresión:

$$E = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x}$$

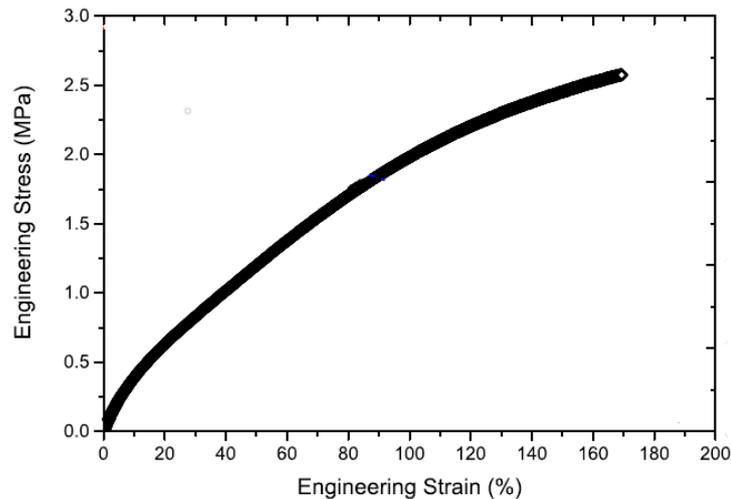


Ilustración 25: Diagrama tensión-deformación. Cabello, M (2016)

En el caso del material hiperelástico, como esta relación sabemos que ya no es lineal, el Modulo de Young se dará para un porcentaje de deformación respecto la forma inicial. Como expone en el artículo (Chiminelli, A (2019)), para un adhesivo flexible como el poliuretano, que se comporta como una goma, se puede caracterizar como un material hiperelástico, obteniendo mediante un ensayo de tracción el módulo de Young de la parte lineal de la curva de tracción-deformación. De igual manera, para (Duncan, B (2003)) la caracterización de los materiales hiperelásticos en el caso del módulo de Young se podrá realizar con la parte lineal de la curva de deformación, referida a la deformación elástica.

En cuanto a los procedimientos de ensayo que se emplean en el caso de E , podemos encontrar algunos como:

- ISO 37:2005:

Esta norma ISO se emplea para la obtención de la resistencia a la tracción, alargamiento de rotura, tensión para un alargamiento dado o alargamiento para tensión dada y tensión en el rendimiento o alargamiento en el rendimiento. De esta forma nos permitirá la obtención del diagrama tensión-deformación que caracteriza a materiales vulcanizados y termoplásticos.

Con la grafica resultante del ensayo se podrán obtener las propiedades del material elegido. Existen dos geometrías validas para esta norma, la probeta de hueso de perro o anillos, según que parámetros se quieran obtener, la norma aconseja el uso de uno u otro, las medidas de estas también estarán normalizadas.

Para el caso de material de tipo goma en (Sasso, M (2008)) se emplea el ensayo de tracción uniaxial de acuerdo al ISO37:2005 empleando la geometría de hueso de perro. Además, en el artículo de (Cabello, M (2016)) explica como para obtener las propiedades del material hiperelástico de manera similar a (Duncan, B (2003)), empleando las probetas de hueso de perro de acuerdo a ISO37:2005.

- BS 2782:

Esta normativa es desarrollada por British Standard con el nombre de Methods of testing plastics equivaliendo a la norma internacional ISO 293:1986. En concreto, es la tercera parte del BS 2782 (Methods of testing plastics. Mechanical properties. Tensile strength, elongation and elastic modulus), la que se especifica para la obtención del Modulo de Young. Al igual que en el caso anterior, en las pruebas realizadas en los diferentes artículos se ha empleado la geometría de hueso de perro. Toda la información completa estará recogida en el documento [6].

- ASTM D412

Es una prueba comúnmente empleada para determinar propiedades a tracción de elastómeros termoplásticos y termoestables. El ASTM D412 es capaz de medir la elasticidad de un material sometido a tracción y su comportamiento al cesar la carga. Como se muestra en el documento [4]:

Existen dos alternativas para las probetas de este ensayo: El tipo A o hueso de perro y el tipo B o anillo, siendo la de hueso mucho más común. En el ensayo de (Staudt, Y (2018)) se emplea en un ensayo de tracción uniaxial con la probeta de hueso de perro para el adhesivo de silicona.

- ISO 527:

Al igual que las anteriores normas, el objeto de esta será la caracterización mecánica de los materiales para ensayo. Se pueden obtener algunos datos como: tensión de tracción, deformación, punto de fluencia, punto de rotura, modulo de tracción o coeficiente de Poisson. Este ensayo consiste en una prueba a tracción para materiales plásticos, donde se aplica una carga a una velocidad controlada y se lleva la probeta hasta la rotura.

En este ensayo de igual modo que en los anteriores las geometrías de las probetas vienen definidas, siendo de nuevo el hueso de perro la elegida. Existen diferentes dimensiones para cada tipo de probeta en función del material que se quiera ensayar.

Se encuentran en artículos como (Dias, V (2014)), donde se caracteriza un material como la silicona como un material hiperelástico, mediante el uso de las probetas 1B de hueso de perro de esta norma se realiza una prueba de tracción para obtener el módulo E. De igual forma, en el caso de (Crocker, L. E (1999)) se va a emplear esta norma para la realización de los ensayos de tensión uniaxial con una probeta de hueso de perro y una velocidad de 4mm/min para adhesivo hiperelástico. También será empleado en un ensayo de tracción con la probeta de hueso de perro por Dispersyn. J (Dispersyn, J (2017)).

2.2.2.2. COEFICIENTE DE POISSON:

Los ensayos que se pueden realizar para obtener el coeficiente de Poisson son en su mayoría idénticos al Modulo de Young, son dos parámetros relacionado, por lo que podrán conocerse uno a través del otro. Este parámetro se emplea para medir la deformación que sufre el material de manera trasversal a la aplicación de la carga, en relación a la deformación en el sentido de la carga. Se tendrá así que para una fuerza en dirección X (F_x), se da una deformación tanto en X como en Y, teniendo un Coeficiente de Poisson de $\nu = \left| \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \right|$. El valor de ν irá desde 0 hasta 0'5, totalmente compresible a incompresible, respectivamente, como se recoge en el documento [23].

Lo que encontramos en algunos artículos sobre el coeficiente de Poisson, en el caso de los materiales hiperelásticos, es que como al igual que E, es solo válido para un porcentaje de deformación. No es posible adoptar un valor único para todo el rango de deformación, por lo que algunos autores optan por distintas alternativas: en los ensayos llevado a cabo por Lubowiecka (Lubowiecka, I (2012)), se decide establecer un valor próximo a 0,5 para un adhesivo flexible polimérico de Terostat MS9360s, y mediante la simulación con ordenador se prueban diferentes variaciones para determinar, para el material concreto, que valor es el más representativo. Otro método que se muestra en (Amstutz, C (2018)) es la realización de un ensayo de compresión con una muestra cilíndrica de adhesivo de poliuretano, incorporando lubricante a las superficies donde se aplica la carga para evitar el efecto de contracción en los bordes debido a la fricción. Debido a estas dificultades para determinarlo de manera precisa, se recurre a la consideración del adhesivo como incompresible, o bien, una determinación del valor mediante la ingeniería inversa, en (Cabello Ulloa, M. J. (2016)) se emplea la técnica de correlación digital de imagen, compara el comportamiento de coeficiente de Poisson

para un material incompresible con la variación de Poisson con la deformación del adhesivo SILKRON-H100, concluyendo con que se comporta como incompresible ($\nu = 0,5$). Finalmente, otro tipo de mediciones se llevan a cabo con pruebas ultrasónicas en (Staudt, Y (2018)) obteniendo de nuevo un coeficiente de 0,5 para la silicona.

2.2.2.3. MÓDULO DE CORTE:

El modulo de corte o rigidez G es el equivalente a el modulo de elasticidad o Young, donde se caracterizaba la deformación del material ante un esfuerzo normal. En el caso de G , es un esfuerzo paralelo a la cara donde se aplica (cortante) y causa una deformación sobre el material, tendrá la expresión:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

Siendo τ el esfuerzo cortante $\tau = \frac{F}{lxw}$ (lxw valores geométricos), mientras que γ la deformación debida al cortante $\gamma = \frac{\Delta x}{l}$.

Al igual que para los dos parámetros anteriores, existen ensayos a la hora de determinar tanto el valor del módulo de corte como la resistencia al corte, aunque no siempre tiene porque obtenerse del mismo ensayo, como se expone en (Brown, R. (2002)). Para el caso del módulo de corte, debido a la característica hiperelásticas del material, como es obvio, consiste en aplicar un esfuerzo de tipo cortante sobre el adhesivo y medir la deformación en la zona lineal. Los ensayos más empleados en esta medición serán: solape (lap shear), sándwich, punch shear, torsión o cuatro puntos de carga (4ENF). El más empleado en el caso de los adhesivos suele ser el de solape o sándwich.

En artículo como Lubowiecka (Lubowiecka, I (2012)) se obtiene el valor de G por medio de una prueba de SLJ, de corte en un bloque de adhesivo (ISO 13445:2003), una prueba de 25 mm de espesor y 12,5 mm de solape. Por otro lado en el ensayo de Staudt (Staudt, Y (2018)) con silicona, se descarta el uso de la prueba en H de ETAG 002 por la concentración de tensiones que se provocan en este, optando por una prueba de disco donde por medio de una torsión se somete a corte el adhesivo. Otra manera también implementada, en el caso de Dias (Dias, V (2014)) es el estudio de corte con el doble SLJ, para evitar el efecto de pelado que se daba en este. En el caso de Lucas da Silva, F. M (2009) se realiza las pruebas con el modelo de TAST en lugar de SLJ.

2.2.2.4. MÓDULO VOLUMÉTRICO O COMPRESIBILIDAD:

En un cuerpo la compresibilidad determina la capacidad que tiene para disminuir su volumen ante la acción de la presión o fuerza que actúan sobre él. Los materiales podrán ser en este sentido, compresibles o incompresibles. Como sabemos la compresibilidad depende del estado de agregación que presente el material, de forma que para los gases es bastante alta, menor para los líquidos y prácticamente nula en los sólidos. Esta capacidad de comprimirse se deriva de la interacción molecular de cada estado de agregación, siendo más elevada para aquellas moléculas que presenten un espacio de separación mayor, es decir, mayor facilidad y capacidad de reducir su volumen. La capacidad de comprimir un material se mide por medio del parámetro del módulo de compresibilidad ($k = \frac{1}{B}$) o modulo volumétrico (B) (bulk modul). Partiendo de la ley de Hooke, la deformación experimentada es proporcional al esfuerzo sobre el material, de esta forma se define el módulo volumétrico como:

$$B = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Para el caso concreto de este trabajo, los adhesivos, son sólidos que podrán presentar cierta compresibilidad, por lo que esta propiedad es bastante polémica entre los diferentes autores en sus estudios. En gran cantidad de trabajos se decide aceptar el error que se puede generar al realizar esta suposición debido a la gran proximidad a la incompresibilidad que se presenta en el material. Algunas de las simplificaciones que permite hacer la incompresibilidad supuesta son:

- El coeficiente de Poisson será igual a 0,5
- En el caso de emplear la caracterización del material con los invariantes principales, el tercer invariante (I_3) será igual a 0
- De manera general, se suele asumir que los adhesivos son materiales isotrópicos incompresibles.

En cuanto a su determinación, a diferencia de los parámetros anteriores, donde el comportamiento del material viene determinado por su geometría y las cargas que le son aplicadas, también existe una propiedad que se conoce como comportamiento en masa o a granel, el cual también se podrá expresar con el módulo en masa o bulk modul (K), que es el inverso a la compresibilidad (B). Este hace referencia al comportamiento del material en una forma amorfa y es necesario conocer para poder caracterizar igualmente

su comportamiento mecánico, como por ejemplo su compresibilidad. Se puede obtener de una manera indirecta a partir de los parámetros anteriores (modulo de Young, de corte y Poisson) o bien por medio de ensayos experimentales específicos para él.

En (Peng, S. H (1994)) se expone uno de los métodos más comunes entre los adhesivos, el ensayo de compresión, que puede ser realizado en una máquina convencional de ensayos de tracción. Sin embargo, debido a las dificultades que presenta en cuanto a la viabilidad y repetitividad, el autor opta por emplear un ensayo para medir la presión que se genera por la compresión del material confinado dentro de un útil en forma de embolo y pistón. Como este comportamiento en masa depende de la tensión volumétrica en el material, se desarrollará para este ensayo una expresión a partir de la curva de presión-tensión, donde se determina el módulo como:

$$K(\epsilon_v) = \frac{dp}{d\epsilon_v}$$

Siendo $K(\epsilon_v)$ la pendiente de la curva de presión tensión.

Este ensayo se realizará con cilindros según ASTM D395, asumiendo la densidad uniforme del material. La presión será la fuerza aplicada sobre el área del material $p = F/A_p$ y la tensión volumétrica $\epsilon_v = \frac{v_0 - v}{v_0} = \frac{t_0 - t}{t_0}$ donde v_0 y t_0 son el volumen y espesor inicial de la probeta. Debido a los posibles errores que se pueden derivar de usar la pendiente de la curva en un material no lineal, se desarrolla una expresión para el módulo en masa con el método incremental:

$$K^{inc}(\epsilon_v) = \frac{\Delta p}{\Delta \epsilon_v} = \frac{p^{i+1} - p^i}{\epsilon_v^{i+1} - \epsilon_v^i}$$

2.2.3. CONSTANTES DE MATERIALES HIPERELÁSTICOS

En la actualidad, es impensable tratar de caracterizar cualquier material sin la ayuda de los cálculos de programas de diseño y simulación, como CAD, Método de elementos finitos o ingeniería asistida, como se refleja en (González Carbonell, R. A (2009)). De igual forma que para el caso del modulo de Young, corte o el coeficiente de Poisson, en los materiales elásticos este tipo de simulaciones se desarrollan en base a la relación entre el esfuerzo y la deformación, es decir, la Ley de Hook. Sin embargo, como se definió anteriormente, los adhesivos se comportan como un material hiperelástico, por lo que esta ley no siempre resulta suficientemente representativa.

A lo largo de la historia diferentes autores han intentado caracterizar este tipo de comportamiento con diferentes teorías, todos han desarrollado diferentes modelos materiales para llevar a cabo esta caracterización. De manera general se pueden distinguir tres grandes enfoques, que se encuentra en el trabajo de (Bergström, J. S. (s.f)): modelos hiperelásticos, modelos hiperelásticos con el efecto Mullins y modelos dependientes del tiempo. En esta ocasión vamos a descartar este último y quedarnos con los modelos propuestos de las dos primeros tipos.

2.2.3.1. MODELOS HIPERELÁSTICOS

Los modelos de materiales hiperelásticos buscarán la función de densidad de energía de deformación (W) que mejor describa el comportamiento del material que se pretende estudiar. Como se muestra en (González Carbonell, R. A (2009)), es en el artículo de la Revista Robotiker donde aparece que Rivlin en 1990 propuso la función (W) como un polinomio, de forma:

- $W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ en base a los alargamientos principales, para cada uno de los ejes principales $\lambda = \frac{L}{L_0}$
- $W = W(I_1, I_2, I_3)$ con los invariantes de deformación: $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$; $I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2$; $I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$

En este punto surgen dos vertientes en los modelos desarrollados, los que se basan en los invariantes o los que se desarrollan a partir de las deformaciones, además, podrán existir modelos donde se considere el material como incompresible o bien lo contrario. También los vamos a clasificar en función del procedimiento empleado para hallar los parámetros de estas funciones mediante ensayos:

Teorías presentadas en la historia: de manera general en el trabajo (Marckmann, G (2006)) se distinguen tres vertientes dentro de los modelos hiperelásticos para desarrollar la función polinómica de densidad de energía de deformación (W). Tomando de base la ecuación de Rivlin de los invariantes de Cauchy-Green en las tres direcciones principales, se desarrolla la función W como:

$$W = \sum_{i+j+k=1}^{\infty} C_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 1)^k + \sum_{n=1}^N \frac{1}{D_n} (J_{el} - 1)^{2n}$$

La primera parte de la ecuación hace referencia a la energía desviatoria U_{dev} y el segundo recoge la energía volumétrica U_{vol} . Donde C_{ijk} es el coeficiente de Rivlin, I_n son los invariantes, D_n es un parámetro del material para introducir la compresibilidad y J_{el} es la relación de volumen elástico.

- **MODELOS FENOMENOLÓGICOS:**

La función de energía se obtiene a partir de desarrollos matemáticos, la determinación de las constantes se puede complicar al ensayar el material fuera del rango desarrollado por el autor. Algunos de los más importantes se muestran en (Marckmann, G (2006)) como:

I. Polynomial model:

Es una derivación de la ecuación general, en base a los dos primeros invariantes I_1 y I_2 . Considerando el material como incompresible $I_3 = 1$,

$$W = \sum_{i+j=1}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i}$$

II. The Mooney-Rivlin model (M-R):

Es una evolución de modelo de Mooney desarrollada por Rivlin, la función de energía W se expresa como un polinomio.

$$W = \sum_{i,j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i}$$

Donde C_{ij} son los parámetros materiales, siendo $C_{00} = 0$. Se suele emplear como mucho hasta el tercer orden. Este caso el material se considera como incompresible, por lo que $I_3 = 1$

III. The Ogden model:

El autor propone derivar la función W en función de deformación generalizada, llegando a la expresión.

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i}$$

Donde μ_n y α_n son parámetros del material. Odgen propuso un segundo orden que se ajusta para casos de tensión uniaxial y equibiaxial y un tercer grado que se ajustaba bastante bien a la tensión simple, la cortadura pura y la tensión equi-biaxial. Como se muestra en (González Carbonell, R. A (2009)) este modelo es aplicable a cualquier dureza y con un buen ajuste en comportamientos de grandes deformaciones. Es junto a M-R uno de los más extendidos en la bibliografía.

- **MODELOS EXPERIMENTALES:**

Consiste en obtener las derivadas parciales de cada componente de la función de densidad de energía respecto cada invariante ($\frac{\partial W}{\partial I_1}$ y $\frac{\partial W}{\partial I_2}$) de un método experimental:

- I. Rivlin and Saunders model:

Se emplea una prueba biaxial de tracción para obtener experimentalmente los invariantes I_1 y I_2 . Se observa que para la prueba de caucho natural $\frac{\partial W}{\partial I_1}$ no depende I_1 y I_2 y $\frac{\partial W}{\partial I_2}$ no depende de I_1 , pudiendo expresar la función W como:

$$W = C(I_1 - 3) + f(I_2 - 3)$$

Donde f es la función determinada de la prueba biaxial

- II. Yeoh's Approximation:

En el trabajo de Yeoh, O. H (1997), se expone como el autor observa que es imposible obtener $\frac{\partial W}{\partial I_1}$ y $\frac{\partial W}{\partial I_2}$ de manera independiente con un experimento cada una, es necesario un ensayo de tipo biaxial, donde ambas tensiones sean totalmente independientes. Debido a la dificultad de que los datos obtenidos en este tipo de ensayos estén libre de errores, y fijándose en estudios anteriores como los de Following Gregory, donde se observa como $\frac{\partial W}{\partial I_2}$ es mucho más pequeño que $\frac{\partial W}{\partial I_1}$, Yeoh decide tomarlo como 0. Pese a cometer este error, la desviación de los datos no es muy grande, de esta forma se puede expresar la energía como:

$$W = \sum_{i=1, j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i}$$

Siendo siempre la componente $j=0$ y C_{ij} la constante del material.

• **MODELOS FÍSICOS:**

Se desarrollan a partir del comportamiento físico del polímero, caracterizado mediante la experiencia. La función de energía se expresa en función de los procesos que tienen lugar dentro del material, las más extendidas son:

I. Neo-Hookean model (N-H):

Es uno de los modelos físicos más simples, que deriva de la función W de Mooney-Rivlin de primer orden $W = C_{10}(I_1 - 3)$, donde $C_{10} = \frac{\mu_1}{2}$ o de la de Odgen $\frac{\mu_1}{2}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3)$. La clave del uso de este modelo es por ser capaz de emplearse para materiales con pocos datos, a partir de la función estadística de la energía que se muestra en (Marckmann, G (2006)):

$$W = \frac{1}{2} C_{NKT} (I_1 - 3) + \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^2$$

Siendo K la constante de Boltzmann's, T la temperatura absoluta y N el numero de cadenas en unidad de volumen.

II. The Isihara model:

Con la teoría no-Gaussian, Isihara obtiene el polinomio de Rivlin W como:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{01}(I_2 - 3)$$

III. Arruda-Boice o 8-chain model:

Fue desarrollado por los autores Arruda y Boice en 1993, es un modelo de cadenas en 8 direcciones, correspondientes a cada vértice de un cubo dentro de una esfera con radio unidad. También la encontramos en (Marckmann, G (2006)):

$$W = \mu \sum_{i=1, \lambda_m}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (I_1 - 3)^i + \frac{1}{D_i} \left[\frac{J_{el}^2 - 1}{2} - \ln(J_{el}) \right]$$

Donde C_i es el coeficiente del material μ el modulo inicial de cizalladura y λ_m el alargamiento hasta el bloqueo.

2.2.3.2. MODELOS CON EFECTO DE MULLIS

Se emplearán para poder contemplar el efecto de Mullins en la caracterización del adhesivo. No obstante, el uso de estos modelos es compatible con los anteriores. De manera general destacan dos modelos:

I. Ogden-Roxburgh Model:

El modelo fue propuesto por los autores Ogden y Roxburgh como una ampliación de los modelos hiperelásticos. Esta se muestra en los documentos de (Ogden, R. W (1999); Bergström, J. S. (s.f)), y expresa como tienen la intención de incluir el efecto de Mullins en la función de densidad de energía de deformación W . Esta energía es denotada como:

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, n) = nW(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$$

$$W(\lambda, n) = nW_d(\lambda) + \varphi(n) + W_{vol}(J^{el})$$

Donde λ son las deformaciones principales y n la variable de daños:

$$n = 1 - \frac{1}{r} \operatorname{erfc}\left(\frac{W_{dev}^{max} - W_{dev}}{m + \beta W_{dev}^{max}}\right)$$

$$\varphi(n) = \frac{(m + \beta W_{dev}^{max})}{r\sqrt{\pi}} \left[\exp\left(-\left[\frac{W_{dev}^{max} - W_{dev}}{m + \beta W_{dev}^{max}}\right]^2\right) - 1 \right] + (1 - n)W_{dev}^{max}$$

Las variables r, m y β son los parámetros del material, que se estudiarán más adelante; $\operatorname{erfc}(x)$ es la función de errores y W_{dev}^{max} y W_{dev} son la energía máxima de deformación y la de deformación respectivamente.

Los parámetros del material:

- r : medirá la extensión del daño con respecto al estado virgen.
- m : medirá la dependencia del daño en la extensión deformada. Cuando el valor sea grande, el daño causado por las anteriores deformaciones será de importancia.

En el caso de este modelo de material hiperelástico la energía U ya no es un potencial de energía almacenada, parte de la energía aplicada para la deformación se disipa por el daño. La variable n es la que permite controlar las propiedades del material para explicar la diferente respuesta de la energía en la carga y en la descarga. Esta variable podrá estar activada o no y cambiar de un estado a otro. Cuando la variable está desactivada, el comportamiento del material es elástico con una energía de deformación constante, ya que $W(\lambda, n)$ únicamente depende de la deformación, sin embargo, cuando

esta está activa, el comportamiento elástico pero gobernado por una ecuación de energía de deformación distinta.

Como se explica en (Ogden, R. W (1999)) en el proceso de carga y posterior descarga, la descarga podrá tener lugar en cualquier momento, y será este el punto donde se activa la variable n y la función de energía presentará la forma $W(\lambda, n) = nW_d(\lambda) + \varphi(n)$

II. Qi-Boyce Model:

Al igual que el modelo anterior en el artículo (Bergström, J. S. (s.f)), los autores Qi y Boyce desarrollaron un modelo donde se incluye el efecto de Mullins. Consideran que el elastómero consta con dos fases, una dura y otra blanda.

$$U = (1 - v_f)U(I_1)$$

La variable v_f hace referencia a la parte del volumen referida a la deformación dura

$$v_f = v_{ff} - (v_{ff} - v_{fi}) \exp \left[-\frac{A(\Lambda_{chain}^{max} - 1)}{\lambda_{lock} - \Lambda_{chain}^{max}} \right]$$

Las variables v_{ff} y v_{fi} representan la fracción de volumen final e inicial respectivamente de la fase dura; Λ_{chain}^{max} hace referencia al máximo estiramiento de la cadena durante todo el historial de deformación. Este modelo aun no está muy desarrollado en los simuladores de MEF, por lo que se suele implementar mediante alguna modificación del código por el autor.

III. Bergstrom-Boyce Model (B-B):

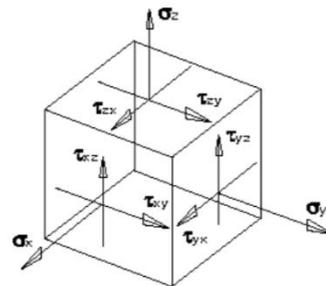
Se muestra en (Bergström, J. S. (s.f)) como un modelo físico desarrollado por Bergstrom y Boyce, basado en la observación experimental de la respuesta de gomas. Este modelo se desarrolla a partir de la representación del comportamiento micro-mecánico de dos redes actuando en paralelo: una cadena esta en equilibrio mecánico, mientras la otra depende del tiempo. La expresión desarrollada expresas la tasa de flujo viscoelástico en función del estado de deformación y tensión:

$$\dot{\gamma} = (\lambda^{chain} - 1)^c \left(\frac{\tau}{\tau_{base}} \right)^m$$

Donde $\dot{\gamma}$ es tasa de flujo visco-elástico, C , m y τ_{base} son parámetros del material, τ es el esfuerzo cortante efectivo.

2.2.4. GEOMETRÍA DE LOS ENSAYOS:

Independientemente de que simulemos o no las características de las condiciones de uso del adhesivo, los ensayos más empleados son: ensayos de tracción, compresión, cizalladura o pelado. Todas estas pruebas se llevan a cabo con probetas en tres dimensiones, teniendo en cuenta la distribución de tensiones, los esfuerzos se podrán estudiar de la siguiente forma:



En la figura se muestra un sólido infinitesimal en tres dimensiones, donde todas sus caras presentan tres esfuerzos ortogonales: la esfuerzo normal al plano σ_x y dos esfuerzos tangenciales entre si y actuando sobre el plano τ_{yx} y τ_{xz} . A partir de estos esfuerzos se derivan las deformaciones, correspondientes a cada uno de ellos ϵ . En base a cuántos de estos esfuerzos estén teniendo lugar en nuestra probeta las podremos clasificar los diferentes ensayos.

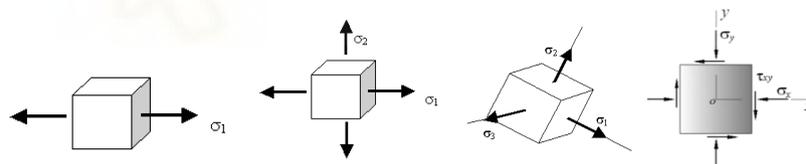


Ilustración 26: Estados tensionales: uniaxial, biaxial, triaxial. [23]

2.2.4.1. ENSAYOS CARACTERIZACIÓN CONSANTES HIPERELÁSTICAS:

Para poder obtener las constantes de los materiales hiperelásticos que los autores formulan en sus modelos, se requiere de una serie de ensayos. Aunque existen bastantes variaciones en función de las máquinas disponibles, el material o el error que se pretende asumir, los principios que rigen los diferentes ensayos se pueden agrupar en:

I. Tensión uniaxial:

Reciben este nombre los ensayos donde la probeta únicamente es sometida a un esfuerzo en una de sus tres direcciones principales (σ_x o τ_{xz}). Es importante asegurarse de que en el resto de direcciones no se de ningún esfuerzo, para ello, el diseño del

ensayo tiene vital importancia. Los estados de deformación y tensión se determinan como:

Deformaciones principales:

$$\lambda_2 = \frac{L}{L_0}; \lambda_1 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$$

Tensiones principales:

$$\sigma_2 = \sigma = \frac{P}{A_0}; \sigma_3 = \sigma_1 = 0$$

Algunos de los más habituales son:

- Ensayo de tracción:

La probeta será sometida a una tensión en uno de los ejes principales, provocando un esfuerzo de tracción en la sección perpendicular a la misma. Por lo general lo más extendido en este caso es la probeta en forma de hueso de perro o mancuerna, presente en trabajos como (Chiminelli, A (2019); Kim, B (2012); Sasso, M (2008); Duncan, B (2003); Amstutz, C (2018); Dispersyn, J (2017); Roque, M. R. (s.f)). Para este caso es importante el hecho de que la longitud en el sentido de la carga sea mucho mayor que el espesor, de manera que se asegure la tensión uniaxial, sin la influencia de la contracción lateral, como se expone en (Chiminelli, A (2019); Kim, B (2012)). Esta prueba estará presente en la gran mayoría de trabajos revisados, ya sea como prueba única o junto al resto de las demás, como en el caso de (Wang, X (2004); Staudt, Y (2018)).

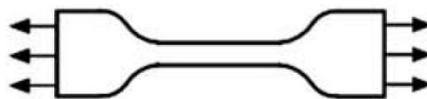


Ilustración 27: Probeta tracción uniaxial. Sasso, M (2008)

- Compresión:

De igual modo que con la tracción, se aplicará una carga perpendicular a una de las caras, de manera que se dé una tensión sobre esta, como por ejemplo se muestra en

(Duncan, B (2019)). Lo más empleado en este caso son los discos o cilindros, autores como (Amstutz, C (2018); Dispersyn, J (2017), Chiminelli, A (2019), Wang, J (2009), Staudt, Y (2018)) los han incluido en sus respectivos artículos. Es importante asegurar que el rozamiento sobre la superficie donde se aplica la carga es despreciable, ya que por el contrario, el desplazamiento lateral quedaría limitado y con él, la condición de uniaxialidad. Para ello una de las soluciones más empleada suele ser la lubricación de las superficies, como en (Amstutz, C (2018))

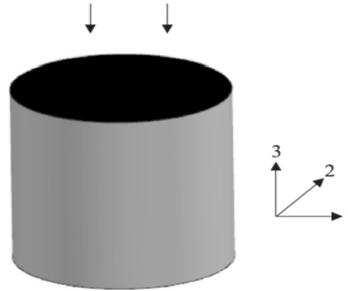


Ilustración 28: Probeta compresión uniaxial. Amstutz, C (2018)

o Cizalladura simple:

En este caso la carga que debe aplicarse generará un esfuerzo cortante sobre una de las caras del material, de manera que esta sea la única que sufra deformación por el ensayo. Los ensayos se suelen realizar para este esfuerzo se conocen como Single Lap Joint (SLJ), podremos encontrarlos en artículos como (Moreira, D. (2013); Nunes, L. C. S. (2011)). Se colocará adhesivo entre dos lámina de sustrato creando un solapamiento, una fuerza de tracción se ejercerá sobre cada lámina, generando un esfuerzo de cortadura sobre la unión adhesivo-adherente. El problema del modelo de SLJ reside en que cuando el adhesivo es muy rígido, la distribución de tensiones no es adecuada sobre este, generando concentraciones. Para solucionarlo se emplea el sistema TAST thick adherend shear test, como en (Hasegawa, K (2015) Parte 1; Niu, R.-M (2014)), que cuenta con un sistema de solapamiento más elaborado, como se muestra en (Ilustración 29)



Ilustración 29: Probeta de cizalladura SLJ y TAST. Chiminelli, A (2019); Hasegawa, K (2015) Parte 1

II. Tensión plana:

Como en el caso anterior se trata de una tensión uniaxial, dado que el esfuerzo únicamente se da en una dirección. Se dará cuando todas las componentes de la tensión se encuentren sobre el mismo plano, es decir, de las tres dimensiones que tiene la probeta, las cargas estarán aplicadas sobre dos de ellas, que conforman el plano de la pieza. Para poder realizar este tipo de ensayos, es importante que la dimensión z de la pieza sea mucho menor al resto, de forma que garantice que las deformaciones van a suceder a lo largo de esta. Los estados de deformación y tensión se determinan como:

Deformaciones principales:

$$\lambda_1 = 1 ; \lambda_2 = \lambda = \frac{L}{L_0} ; \lambda_3 = \frac{1}{\lambda}$$

Tensiones principales:

$$\sigma_1 = 0 ; \sigma_2 = \sigma ; \sigma_3 = 0$$

Los ensayos empleados para esta tipo de tensión son:

- Cizalladura Pura:

A pesar de parecer un simple ensayo de tracción, la importancia de esta prueba está en garantizar que se dé un estado plano de tensiones, por lo que la geometría elegida es importante, podremos ver algunos ejemplos en (Duncan, B (2003); Amstutz, C (2018); Kim, B (2012); Moreira, D. C (2013)). Para garantizarlo, por lo general se toma una anchura mucho mayor a la dimensión en la dirección del estiramiento y mínimo espesor, como se explicaba en (Wang, X (2004))

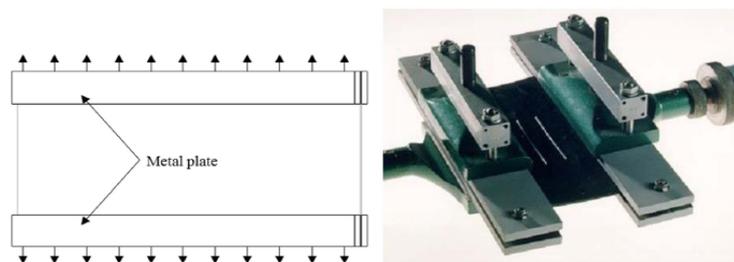


Ilustración 30: Probeta de cizalladura pura. Amstutz, C (2018); Crocker, L (1999)

- Planar tensión test ring:

En este caso la lámina de material adhesivo se sujeta por medio de dos perfiles en forma de L para cada extremo, podemos verlo en (Sasso, M (2008)). Se logra una distribución más uniforme de la tensión en toda la longitud al aplicar la carga.



Ilustración 31: Probeta de cizalladura pura. Sasso, M (2008)

III. Tensión biaxial:

En este tipo de ensayos, las probetas estarán sometidas de manera simultánea a dos esfuerzos, estos podrán ser idénticos (equi-biaxial) o diferentes. Los esfuerzos que se apliquen no serán distintos que para el caso de las uniaxiales. Los estados de deformación y tensión se determinan como:

Deformaciones principales:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = \frac{L}{L_0}; \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$$

Tensiones principales:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma; \sigma_3 = 0$$

Existen diversos métodos para aplicarlos, sin embargo, para lograr reducir los errores y simplificar la reproducibilidad en todos los laboratorios, los ensayos más extendidos son:

- Equi-biaxial de tijera:

Mediante unas mordazas en forma de tijera y la probeta en forma de cruz, se puede lograr un esfuerzo de tracción idéntico en dos planos, como se muestra en trabajos como (Amstutz, C (2018); Kim, B (2012); Roque, M. R. (s.f)).

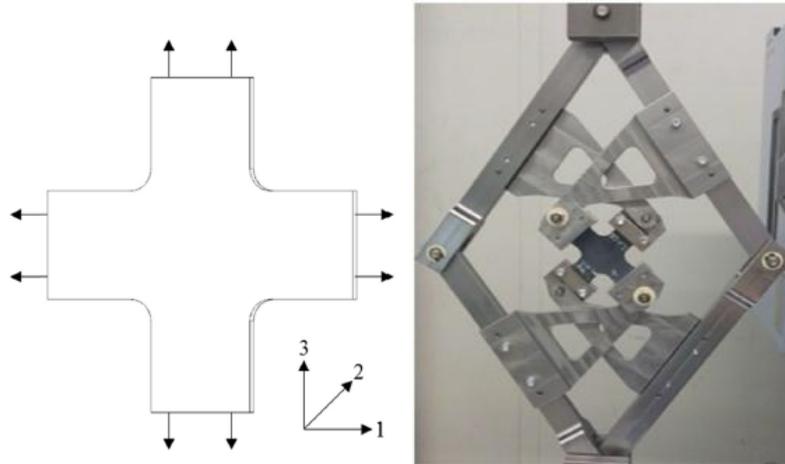


Ilustración 32: Probeta de tracción biaxial. Amstutz, C (2018)

o Buble test ring:

Consiste en un ensayo biaxial en el que mediante la expansión del material en forma de burbuja, se logra un estado biaxial en la superficie de la burbuja. En un método sencillo, sin embargo no es válido para cualquier material, debe poder deformarse hasta esta geometría sin que suceda la rotura. Podemos encontrar este ejemplo en trabajos como (Sasso, M (2008)).

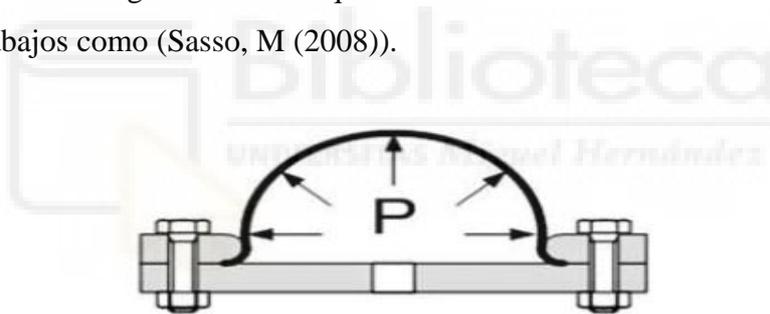


Ilustración 33: Probeta de buble test. Sasso, M (2008)

2.2.4.2. SIMULACIÓN PARA LAS CONSTANTES HIPERELÁSTICAS:

Una vez realizado los ensayos experimentales se deben obtener los parámetros de los diferentes modelos hiperelásticos. El método elegido a día de hoy por la gran mayoría de autores es la simulación numérica mediante programas de elementos finitos. Dentro de los diferentes artículos y trabajos que hemos revisado nos encontramos básicamente con los mismos enfoques, pese a presentar pequeñas diferencias. Los autores van a emplear los ensayos anteriormente descritos para obtener el comportamiento del material en la gráfica de tensión-deformación. Estos datos obtenidos de las pruebas experimentales serán introducidos a un programa de simulación numérica, como por ejemplo ABAQUS, donde el programa será capaz de mostrarnos los distintos parámetros de los modelos hiperelásticos que tenga en su base

de datos, en función de la representación que sea capaz de hacer con estos datos de tensión y deformación que le hemos implementado. Posteriormente, con los materiales ya bien definidos, podremos simular el ensayo en estos mismos programas para ver las concordancias que obtenemos con el ensayo real, al igual que emplearlo para evaluar otras condiciones sin necesidad de ensayar en laboratorio.

Autores como Duncan (Duncan, B (2003)) obstan por realizar únicamente una prueba experimental, de tracción uniaxial en este caso, dado que es la más representativa y sencilla. Sin embargo, prácticamente la totalidad de autores ha preferido emplear al menos tres de los ensayos, destacando: tracción uniaxial, biaxial y cizalladura pura. Algunos de estos ejemplos los encontramos en trabajos como (Roque, M. R. (s.f); Duncan, B (2019); Amstutz, C (2018); Kim, B (2012)). En otros ejemplos únicamente se quedarán con dos ensayos: tracción y compresión uniaxial en (Chiminelli, A (2019)), cortadura pura y simple en (Moreira, D. C (2013)) o bien con una combinación diferente, dejando de lado el ensayo biaxial, como en el caso de (Dispersyn, J (2017); Wang, X (2004); Staudt, Y (2018)) con tracción, cortadura y compresión.

Partiendo de estos distintos ensayos, cada autor ha elegido diferentes modelos de los anteriormente descritos para intentar representar su comportamiento, de manera general podemos destacar que existen en torno a 4 de ellos, que son los más empleados: N-H, M-R, Yeoh u Ogden. No obstante, también se hará uso de alguno de los demás. Lo que encontramos en los diferentes trabajos es que no siempre se puede elegir el mismo modelo, sino que en función del tipo de material y los ensayos que se le practiquen resultará más conveniente alguno. De esta forma, tenemos como por ejemplo (Chiminelli, A (2019)) prueba con Ogden, Arruda, Polinomial o M-R, siendo en su caso el más representativo para en ensayo de tracción y de compresión uniaxial el modelo polinomial. Por otro lado tenemos otro artículo como el de (Kim, B (2012)) donde se realizan los tres ensayos geométricos y al compararlos con los modelos de N-H, M-R y Ogden, tan solo este último logra tener una buena similitud para los tres ensayos, descartando los otros por no ser tan representativos con la parte de grandes deformaciones. Sin embargo, en el caso del trabajo de (Amstutz, C (2018)), para el mismo tipo de ensayos y con los modelos de M-R, NH, Yeoh y Arruda, decide buscar un modelo que sea bueno para todas las geometrías de ensayo, concluyendo que el único para esto es el de M-R. Con respecto a los autores que deciden ensayar la tracción

uniaxial, la cortadura y la compresión, en (Dispersyn, J (2017)) se analiza un total de 14 métodos para decantarse por Ogden. También nos encontramos con los trabajos acerca del efecto Mullins y los modelos orientados a esto, en el trabajo de (Zúñiga, A. E (2006)) se presentan el modelo con efecto hiperelástico de Ogden-Rox, para estudiar los materiales elastómeros. Por otro lado, en el documento (Bergström, J. S. (s.f)) se hará uso de los modelos hiperelásticos de Yeoh, Arruda y Ogden, junto con los que incorporan el efecto mullins de Qi-Boyve y Bergstrom-Boyce. El autor concluye que el comportamiento más próximo a la realidad para los elastómeros se logrará con el modelo de B-B.

2.2.4.3. NUEVOS MODELOS CONSTITUTIVOS

Debido a la creciente utilización de materiales hiperelásticos, se ha dejado ver algunas de las limitaciones que presentan los modelos anteriormente descritos. Sin embargo, todos estos están implementados en los programas de simulación y calculo de elementos finitos, de manera que todos los nuevos modelos que se generen para mejorar la simulación del comportamiento hiperelástico se deben implementar de manera manual por los usuarios incluyendo las características del material, en forma de subrutinas personalizadas, es decir, el proceso de resolución que encontramos pre-existente en el programa admite cierto grado de modificación. El autor deberá modificar este por medio de procesos o funciones secundarias que le devolverán un valor tras las correspondientes ejecución de las operaciones, con el cual se retornará al el modelo constitutivo pre-instalado para completarlo.

En el documento (Castillo-Méndez, J. C (2019)) se desarrolla un modelo constitutivo para material hiperelástico a partir de la formula de energía de deformación por unidad de de volumen, de la forma:

$$S = 2 \frac{\partial \psi}{\partial C}$$

Donde S es el segundo tensor de Piola-Krichhoff, $C = F^T F$ el tensor de deformación derecho de Cauchy y $F = \frac{\partial x}{\partial X}$ como tensor gradiente de deformación. Como la función ψ en materiales hiperelásticos isotrópicos solo depende de la deformación, se desacopla en la suma de la contribución volumétrica e isocórica, se descompone así el gradiente de deformación: $F = J^{1/3} I\bar{F}$, con $J = \det(F)$ y \bar{F} la parte que conserva el volumen. La

expresión de la energía de deformación se podrá representar por medio de los invariantes de tensor isocórico derecho de deformación $\bar{C} = \bar{F}^T \bar{F}$:

$$\psi = \psi(C) = \psi_{vol}(J) + \overline{\psi_{iso}}(\bar{I}_1, \bar{I}_2)$$

Los invariantes están dados por $\bar{I}_1 = tr(\bar{C})$ y $2\bar{I}_2 = [tr^2(\bar{C}) - tr(\bar{C}^2)]$. Por otro lado, esta descomposición nos deja el tensor S de la forma:

$$S = S_{vol} + S_{iso} = 2 \left(\frac{\partial \psi_{vol}}{\partial C} + \frac{\partial \overline{\psi_{iso}}}{\partial C} \right)$$

Aplicando los invariantes a esta formulación quedará como:

$$S = pJC^{-1} + 2 \left[J^{-\frac{2}{3}} \frac{\partial \overline{\psi_{iso}}}{\partial \bar{I}_1} + \bar{I}_1 \frac{\partial \overline{\psi_{iso}}}{\partial \bar{I}_2} I - J^{-\frac{4}{3}} \frac{\partial \overline{\psi_{iso}}}{\partial \bar{I}_2} C \right] - \frac{2}{3} \left(\bar{I}_1 \frac{\partial \overline{\psi_{iso}}}{\partial \bar{I}_1} + 2\bar{I}_2 \frac{\partial \overline{\psi_{iso}}}{\partial \bar{I}_2} \right) C^{-1}$$

Por otro lado, tendremos el tensor de esfuerzos para la configuración deformada a partir del tensor S:

$$\sigma = pI + \frac{2}{J} \left[\left(\frac{\partial \overline{\psi_{iso}}}{\partial \bar{I}_1} + \bar{I}_1 \frac{\partial \overline{\psi_{iso}}}{\partial \bar{I}_2} \right) \bar{B} - \frac{\partial \overline{\psi_{iso}}}{\partial \bar{I}_2} \bar{B}^2 \right] - \frac{2}{3J} \left(\bar{I}_1 \frac{\partial \overline{\psi_{iso}}}{\partial \bar{I}_1} + \bar{I}_1 \frac{\partial \overline{\psi_{iso}}}{\partial \bar{I}_2} \right) I$$

Donde $\bar{B} = \bar{F}\bar{F}^T$ es el tensor de deformación izquierda y p la presión hidrostática

2.3 CARACTERÍSTICAS DE ROTURA

2.3.1. INTRODUCCIÓN:

Además de la caracterización mecánica del adhesivo, también será de importancia el estudio del comportamiento ante la rotura de estos materiales. A modo de introducción vamos a mencionar algunas de las teorías más empleadas a lo largo de la historia de la mecánica de materiales, en el artículo (Chaves, F. J. P(2012)) se va a centrar en los enfoques que se suelen presentar para estudiar las uniones con estos materiales adhesivos, son tres las teorías más destacadas: mecánica continua, asumiendo la unión perfecta entre los materiales y el comportamiento como un material de medios continuo; mecánica a fractura, asumiendo la unión de diferentes materiales, donde los defectos o impurezas generan concentración de tensiones; por último, la mecánica de daños, que combina el daño cohesivo y continuo. En este mismo estudio, el autor argumenta que de las tres anteriores, únicamente las dos últimas se realizan para la caracterización.

En la mecánica a la fractura se diferencia entre tres modos de fallo que son básicos para la propagación de la grieta en cualquier sólido, son conocidos como: modo I, modo II y modo III o mixto. Estos son extendidos más tarde a la mecánica de daño.

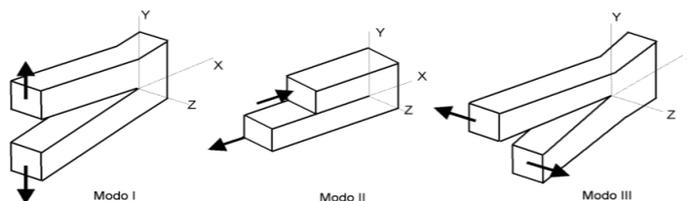


Ilustración 34: Modo de apertura de grieta. [3]

Para cualquier enfoque que se vaya a emplear para la caracterización, el fin último de todos los trabajos en la caracterización es hallar la tasa de liberación de energía (G) y el comportamiento de la fractura ante el crecimiento de la grieta. A modo de resumen podemos ver lo que se busca para cada teoría:

2.3.2. MECÁNICA A LA FRACTURA:

En esta teoría se va a suponer que existen defectos entre los componentes y por tanto no se comporta como un material continuo, existen combinaciones de tensiones, defectos en la estructura y una tenacidad del material a la fractura. En función de las características que posea el material a estudiar, se distinguen dos alternativas a la hora de caracterizar la rotura de las uniones adhesivas: Mecánica a la Fractura Elasto-Lineal y Mecánica a la Fractura Elasto-Plástica. Estas dos clasificaciones son distinguidas de forma bastante clara en el documento [3], aportando bastante contenido a las siguientes explicaciones. Como se expone en (Chaves, F. J. P (2012)), son dos los criterios fundamentales que se basa esta teoría para determinar la fractura, el factor de intensidad de esfuerzo (K) y el concepto de energía (G).

- El factor de intensidad de esfuerzo K : es un parámetro que define el cambio de estado de deformación en la punta de la grieta, originando una tensión infinita en la zona, se expresa como $K_I = Y\sigma_R\sqrt{\pi a}$. De esta ecuación se deriva un valor crítico o límite, a partir del cual se extendería la grieta $K = K_C$.
- El criterio de energía: se basa en la comparación de la energía de deformación presente en el material con la energía crítica de rotura, parámetro característico de cada material $G = G_C$.

2.3.2.1. MECÁNICA A LA FRACTURA ELASTO-LINEAL (MFEL):

De forma general, los mecanismos y procesos de propagación de grietas en un sólido, la distribución de las tensiones en el material y las deformaciones que se suceden, son estudiados por la ciencia de la Mecánica a la Fractura Elasto-Lineal. Esta se desarrolla a partir de los trabajos de Griffith de 1921 y 1924, sobre los criterios de propagación de grietas, por la transformación de energía elástica en energía de superficie. La expresión de tensión de rotura de Griffith (σ_f) vendrá definida por la ecuación:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2}{\pi}} * \sqrt{\frac{E\gamma_s}{a}}$$

Donde γ_s hace referencia a la energía superficial y a el radio de la punta de la grieta.

Años más tarde, por parte de Irwin y Orowan en 1948, se retomaron los estudios de Griffith, los cuales eran válidos únicamente para materiales frágiles, pero no para el resto, ya que, en el resto de materiales, es necesario que la punta de la grieta sea lo suficientemente aguda para provocar el concentrador de tensiones, de manera que supere la resistencia cohesiva del material y se propague el crecimiento. De esta forma, se plantea la existencia en la punta de la grieta de un frente de apertura que genera una plastificación del material en la zona, este efecto se denomina zona de proceso de fractura (FPZ) y se debe tener en cuenta en la tensión de rotura. Por ellos, Irwin va a introducir en la ecuación de Griffith (σ_f), el término de γ_p , donde se contempla el trabajo plástico por unidad de área.

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2}{\pi}} * \sqrt{\frac{E(\gamma_s + \gamma_p)}{a}}$$

De esta forma quedarán incluidos los efectos plásticos, viscoelásticos y viscoplásticos de FPZ. De forma general los términos de las energías ($\gamma_s + \gamma_p$) se van a englobar el W_f .

Más adelante, en 1956 Irwin desarrollo un modelo equivalente a las modificaciones del modelo de Griffith, incluyendo nuevos conceptos, como la tasa de liberación de energía (G), la cual expresa la energía liberada por el material por unidad de avance en la grieta; el factor de intensidad de tensiones (K), que determinará los cambios del estado tensional en la zona del borde de la grieta. Para estas dos variables existen los valores críticos correspondientes K_c y G_c , cuando cualquiera de los dos alcance este valor, se producirá el avance de la grieta. Dado que ambas expresan el mismo concepto pero con

dos criterios diferentes, Irwin establece una relación entre ellas de la forma: $G = \frac{K}{E}$, teniendo en cuenta que $\bar{E} = E$ en la tensión plana y $\bar{E} = \frac{E}{(1-\nu^2)}$ para la deformación plana.

Por último, para poder evaluar la estabilidad del crecimiento de la grieta, se designa el parámetro R o resistencia a la fractura, que es equivalente a $2(\gamma_s + \gamma_p)$. A partir de estas dos variables (G y R) es posible evaluar el crecimiento de la grieta y su estabilidad, siempre que la tasa de liberación de energía (G) sea menor a la resistencia a la fractura (R), el crecimiento de la grieta será nulo, además la estabilidad de este crecimiento se evaluará con la representación de las dos variables, G o R respecto la longitud de la grieta (a), conocida como curva de fuerza motriz o curva R.

- Curva R

Esta curva representa la resistencia del material ante el crecimiento de la grieta y servirá para evaluar la estabilidad de este crecimiento, como se expone en (Joe, C. R (1990)). Puede presentar dos estados según el tipo de material, una curva plana o creciente. Cuando se representa la variable G o R enfrentando al tamaño de la grieta tendremos: para la curva plana, la resistencia del material al crecimiento es constante con el aumento de tamaño (a), de esta forma, para una tensión el crecimiento puede ser estable, sin embargo, si esta tensión aumenta hasta un valor mayor, entraría en la zona de inestabilidad, haciendo que la fuerza motriz crezca al aumentar el tamaño de la grieta; con respecto a la curva R creciente, la grieta crecerá conforme aumente la tensión, cuando alcance un valor de tensión se volverá también inestable:

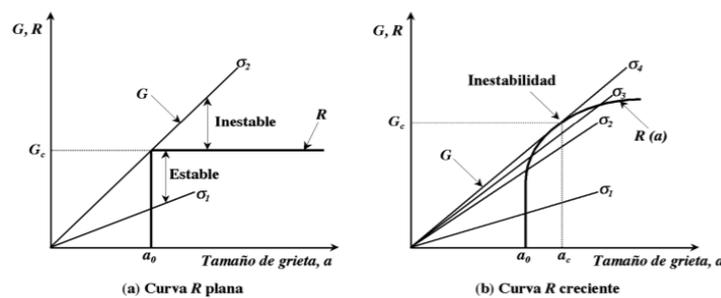


Ilustración 35: Curva R para dos materiales distintos. [3]

Esta propiedad permite establecer un valor de G para la curva plana, sin embargo, en el caso de la curva creciente el valor de G siempre dependerá de la longitud a. Los

materiales frágiles son los que presentan una curva plana, mientras que los que tienen ductilidad pertenecerán a la creciente.

- Factor de intensidad de tensiones

Con respecto al factor de intensidad de tensiones, se plantea para cada modo de fallo una expresión para él, donde el valor de parámetro K condiciona el estado de tensiones y deformaciones

$$\sigma_f = \frac{K_n}{\sqrt{a\pi}}$$

Siendo n el número correspondiente a cada tipo de fallo.

- Corrección de Irwin

Como se ha indicado antes, en la teoría de Irwin sobre la MFEL en general, se supone que existe una zona muy pequeña en el frente de grieta, donde el comportamiento del material es plástico, sin embargo, en los materiales reales esta zona no es tan pequeña y en ocasiones habrá que introducir correcciones para corregir el efecto de la plasticidad. Para tratar de solucionarlo, en 1960 Irwin plantea una corrección en su teoría de la zona plástica, donde se supone que en el comportamiento plástico, la longitud de la grieta (a) es mayor de lo que realmente es en realidad, por lo que para calcular el valor de esta nueva longitud se tomará el valor real (a) más un factor de corrección (δ). De esta forma, el tamaño de la grieta se supondrá como $a_{ef} = a + \delta$.

Como se expone en (Pérez-Galmés, M (2016)) y el documento [3] esta teoría de Mecánica a la Fractura Elasto-Lineal supone que existe una zona de proceso de fractura que es muy pequeña en comparación con las dimensiones de la pieza, sin embargo, en el caso de las uniones adhesivas esta condición no siempre se mantiene, pues pueden darse grandes zonas de proceso de grieta, invalidando los criterios de MFEL.

2.3.2.2. MECÁNICA A LA FRACTURA ELASTO-PLÁSTICA (MFEP):

Cuando no es posible aplicar la teoría de MFEL, dado que la zona de rotura es grande en comparación con las dimensiones, por lo general se recurrirá a la Mecánica a la Fractura Elasto-Plástica, esta nueva teoría permite grandes deformaciones antes de ocurrir la fractura, pudiendo ser no-lineales, visco-elásticas o plásticas. En este tipo de materiales, el proceso de falla es distinto, la plasticidad en la punta de la grieta es tan elevada que provoca una deformación de esta, reduciendo su forma aguda y por tanto disminuyendo la concentración de esfuerzos, esta reducción de la agudeza del frente de

grieta recibe el nombre de CTOD. Este mecanismo fue descubierto por Wells en 1961, donde observó que cuanto mayor era la tenacidad de los materiales, la deformación de este frente de grieta era mayor y por tanto favorecía el cese de la fractura.

Los autores como Wells o Dugdale trataron de relacionar este nuevo parámetro CTOD con el factor de intensidad de tensiones y la tasa de liberación de energía, permitiendo ser compatible los ensayos de MFEL y MFEP:

- Wells: $\delta(\text{CTOD}) = \frac{4}{\pi} * \frac{K_I^2}{\sigma_{ys} E} = \frac{4}{\pi} * \frac{G}{\sigma_{ys}}$
- Dugdale: $\delta(\text{CTOD}) = \frac{K_I^2}{m \sigma_{ys} E} = \frac{G}{m \sigma_{ys}}$ siendo m una variable entre 1 y 2 (de tensión plana a deformación plana)

El problema principal que se presenta con la plastificación es que la energía necesaria para la grieta es mucho mayor, parte de la energía se pierda en la deformación plástica, por lo que el valor de G de la MFEL es mucho menor que en estos materiales. Así en 1967 Lake y Thomas determinaron que la energía de rotura G dependía de las uniones entre las moléculas, y que sería posible eliminar el efecto de la viscosidad para los ensayos de alta temperatura y baja velocidad. Sin embargo, notaron que en estos experimentos la energía era mucho más alta que la de rotura de las cadenas, lo cual era debido a que en la grieta existe una gran deformación de las cadenas, las cuales al romperse vuelven a su estado original disipando una importante cantidad de energía. Esta energía liberada es proporcional a los enlaces que se rompen. Para tener en cuenta los efectos de la visco-elasticidad se propone en (Gent, A. N. (1996)) la expresión:

$$G = G_0 [1 + f(R, T)]$$

De esta forma quedará en la función $f(R, T)$ el efecto de la viscosidad en función de la velocidad y de la temperatura, para el caso de alta velocidad y baja temperatura, el valor de esta función puede ser mucho mayor que G_0 .

- Determinación de apertura del frente de grieta

Para evaluar el valor de este parámetro, además del modo indirecto de Dugdale o Wells, se podrá emplear un ensayo experimental en el laboratorio a partir de una probeta especial con las normas BS7448 o ASTM E 1290.

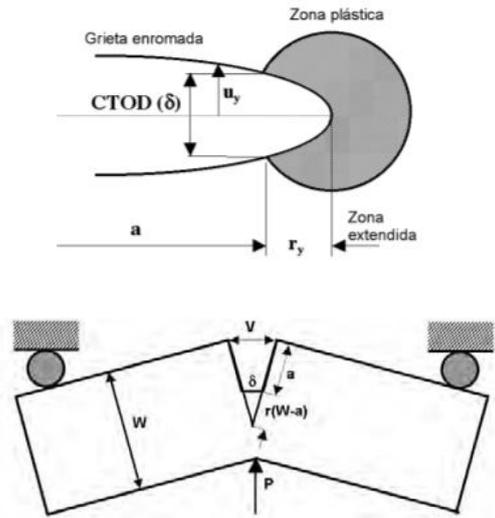


Ilustración 36: Apertura frente de grieta CTOD. [3]

$$\delta = \delta_{el} + \delta_{pl} = \frac{K_I^2}{m\sigma_{ys} E} + \frac{r_p(W-a)V_p}{r_p(W-a) + a}$$

Sabiendo que el valor de r_p está en torno a 0,44 para la mayoría de probetas de ensayo. Además, existe un valor crítico de CTODc para determinar el punto a partir del cual se da el proceso de crecimiento de la grieta.

- Integral J:

Como se expone en el documento [3] la expresión matemática de la integral J existe desde principios del siglo XX, siendo empleado como un parámetro más para la caracterización de la mecánica a la fractura de materiales elásticos no lineales. Fue Rice en 1968 quien estableció las bases para aplicar este concepto de integral a la plastificación en la fractura. A forma de definición, podemos decir que esta expresión representa en la Mecánica de Fractura la liberación energética bajo un estado de tensión determinado que acompaña a una propagación de grieta de tamaño dA , siendo incluso válido para una cierta plastificación en la punta de grieta. Con la ilustración 37 podemos ver tanto la curva carga-deformación de un material elástico lineal y un no lineal.

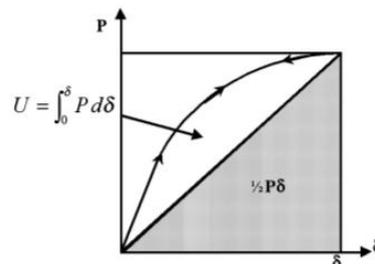


Ilustración 37: Diagrama tensión-deformación para dos materiales distintos. [3]

Como se deriva de esta imagen, la energía almacenada en la deformación en el material no lineal es mucho mayor. Si empleamos la expresión de balance energético de Griffith:

$$U_{fuerza\ ext} = U_{elástica} + U_{propagación\ grieta}$$

Podemos definir la expresión de la integral J para propagación de carga constante y para desplazamiento constante:

$$J = - \frac{\partial U_{propagación\ grieta}}{\partial A} \Big|_u = \frac{\partial U_{propagación\ grieta}}{\partial A} \Big|_P$$

$$J_{carga\ constante} = \int_0^P \left(\frac{\partial \delta}{\partial a} \right)_P dP$$

$$J_{def\ constante} = \int_0^\delta \left(\frac{\partial P}{\partial a} \right)_\delta d\delta$$

Como también se explica en el documento [3], para el caso de la mecánica a la fractura elasto- lineal, el valor de J es equiparable a la energía de liberación en la rotura de Griffith (G):

$$J = \frac{K_I^2}{E}$$

De esta forma se podrá calcular el valor de la integral de la misma manera de G, por medio de los datos experimentales que nos permiten conocer tanto E como K_I .

Sin embargo, cuando se trata de una fractura elasto-plástica, la energía de deformación es absorbida en gran medida por el material plástico, de manera que el valor de la integral J es ahora mucho mayor que la tasa de liberación de energía G. En este documento [3] se expone la posibilidad de medir el valor de esta integral por medio de dos alternativas: la experimentación con probetas o bien mediante la simulación computacional.

- El método experimental se efectuará a partir de la definición de la integral con la siguiente expresión:

$$J = \int_{\Gamma} T_i u_i ds - \int_A w dA$$

Donde $w = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$ la energía por unidad de volumen y $T_i = \sigma_{ij} \eta_{ij}$ el vector tracción. Sobre una lámina de material adhesivo, midiendo la deformación alrededor del frente de grieta por medio de galgas y con un contorno simple de la integral. Este tipo de pruebas serán validas para probetas clásicas de hueso de perro o láminas a tracción con una pre-grieta.

- El método de análisis numérico mediante elementos finitos contractado con los ensayos experimentales.
- Relación entre integral J y CTOD

Como se explica en documento [3], para la MFEL existe una relación entre el valor de G y $CTOD$ con la expresión $G = m\sigma_{ys}\delta$, de manera similar podremos emplear para MFEP la expresión $J = m\sigma_{ys}\delta$, siendo m una constante adimensional que depende del estado de tensiones y las propiedades.

- Curva R

Por último, al igual que para el caso de MFEL en la MFEP se puede elaborar una curva R, donde se enfrenta la integral J o la resistencia a la fractura, con el incremento de a (Δa).

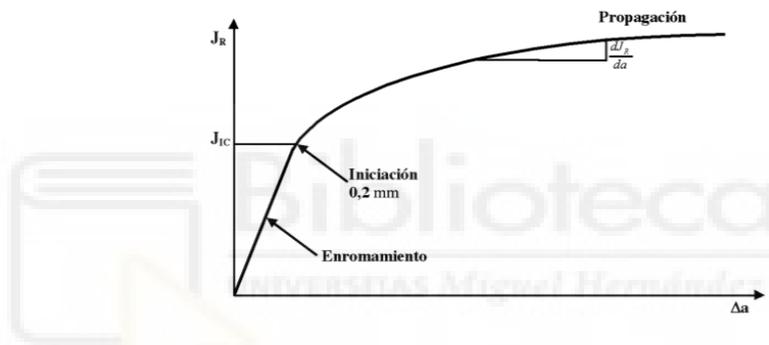


Ilustración 38: Curva R para material dúctil. [3]

En el inicio de la curva, el crecimiento se hace lineal debido a la pérdida de agudeza de la grieta, cuando el valor de J alcanza un punto crítico (J_c), la grieta comenzará a crecer de manera estable, propagándose hasta la rotura. De esta curva se podrá obtener el valor de tenacidad a la fractura J_c .

2.3.3. ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DE MECÁNICA DE FRACTURA

Como se exponía anteriormente, para poder determinar la energía de rotura (G) es necesario recurrir a una serie de expresiones. En los diferentes artículos analizados se han encontrado una serie de probetas más empleadas tanto para el modo de fallo I como II.

2.3.3.1. MODO I: ENERGÍA DE ROTURA A PELADO.

- GEOMETRÍA:

Tiene lugar una tensión de tracción normal (τ_n) al plano por donde avanza la grieta, provoca una separación normal a la superficie de la interface (δ_n), esta combinación se conoce como pelado. Dado que este primer modo es el más común y da lugar a un mayor número de fallos, va a estar presente en numerosas investigaciones. Para poder caracterizar el comportamiento de dicho fallo, se encuentran distintos ensayos que representan este modelo de rotura.

En la revisión bibliográfica de algunos de los artículos acerca de la energía de rotura a pelado se han encontrado diversas probetas:

- Double Cantilever Beam (DCB):

Es conocido en español como doble viga en voladizo. Presenta una geometría como en la (Ilustración 39), consta de una línea de adhesivo encerrado entre dos láminas de sustrato. En un extremo el adhesivo se lleva hasta el final del sustrato, mientras que en el opuesto se podrá también llevarse hasta el final o dejar una zona libre, actuando como generador de concentración de esfuerzos. Por la zona libre de adhesivo, se colocarán dos sistemas para poder aplicar fuerza en el sentido perpendicular a las caras del sustrato. De esta forma se genera un estado de tensiones normal al plano por donde la grieta debe avanzar en el interior del adhesivo.

Las probetas de DCB están muy extendidas entre los diferentes artículos que se han podido revisar, en todos se le da gran importancia a su sencillez tanto en la ejecución como en el ensayo (Zhou, Q.-C (2013); Blackman, B. R. K (2003); Chaves, F. J. P (2014); De Moura (2008)), sin embargo, también se conocen algunas limitaciones. En (Chaves, F. J. P (2014); De Moura (2008)) se advierte de la necesidad de tener en cuenta la rotación que ocurre en las vigas de ambas caras al aplicar la fuerza, además, es necesario medir la longitud de la grieta para cada instante de la curva carga-separación (P-s). ASTM D3433

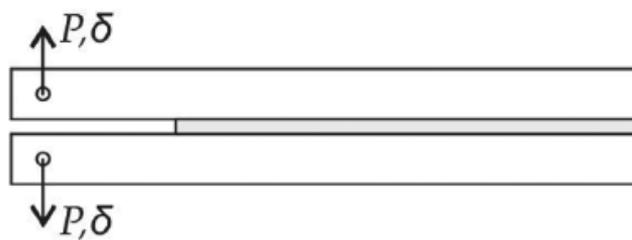


Ilustración 39: Probeta de Double Cantilever Beam. Chaves, F. J. P (2014)

○ Tapered Double Cantilever Beam (TDCB):

Es una variación de DCB pero con una forma cónica, que le dotará de ciertas ventajas. Su geometría será como la de la imagen (Ilustración 40), contando con dos sustratos en forma triangular unidos por medio de un adhesivo de igual manera que la geometría anterior. En la zona más estrecha de los sustratos se dotará de algún sistema para aplicar las cargas que generen el estado de tensiones perpendicular al plano de avance de la grieta por el adhesivo.

Al igual que para el DCB, su uso se justifica en diversos artículos en función de los resultados que se quieran obtener, como expone en (Chaves, F. J. P (2014); De Moura (2008); De Moura, M. F. S. F (2008); Sekiguchi, Y (2015)), la ventaja frente al DCB es que se elimina el problema de la rotación en las vigas laterales, además, la longitud de a grieta se medirá al final de la prueba. Como pequeño inconveniente se suele encontrar la mayor complejidad en la preparación.

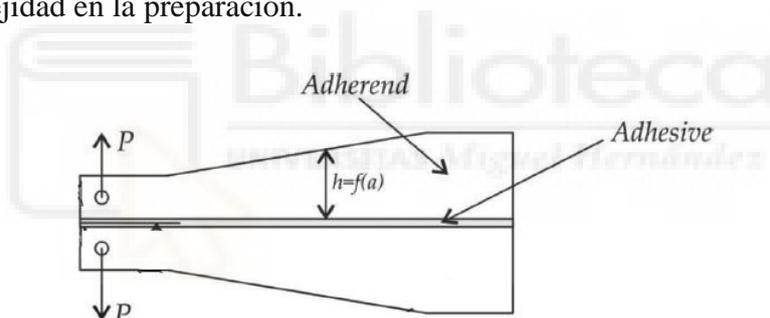


Ilustración 40: Probeta de Tapered Double Cantilever Beam. Chaves, F. J. P (2014)

● OBTENCIÓN DE ENERGÍA MODO I:

I. Método de reducción de datos:

Para determinar la energía de rotura (G) de los diferentes adhesivos, se preparan probetas con geometría de vigas, por lo que para obtener esta energía la Mecánica a la Fractura Elasto-Lineal propone una serie de ecuaciones derivadas de las teorías de vigas clásica de Euler-Bernoulli y Timoshenko. A partir de estas teorías se van a desarrollar diferentes modos de reducción de datos para cada geometría de probeta y modo de fallo, aunque los modelos son muy diversos, los más empleados en la bibliografía de adhesivos son para este modo I, según Blackman en (Blackman, B. R. K (2003); Sekiguchi, Y (2015)) tres métodos para determinar la tasa de liberación de energía G_I :

○ Simpel Beam Theory (SBT):

Para DCB y TDCB (Presente en ASTM-D34433-99 y BS ISO25217:2009). Este modelo deriva de la teoría de MFEL, donde se supone que los sustratos del DCB se comportan como vigas perfecta empotradas (teoría de Timonhsenko), una unión con interfaz rígido y frágil. La teoría de Timonshenko también supone que tanto la rotación y desplazamientos de los brazos o vigas (sustratos) son mucho más pequeñas que las dimensiones de la probeta. De esta forma tenemos entonces que los brazos no se separan durante la grieta.

Para obtener la función de tasa de liberación de energía (G_c) tendremos dos expresiones:

$$G_c = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}$$

La C hace referencia a la flexibilidad, y estará dado por el desplazamiento δ , la carga P y la relación entre estos:

$$\frac{dC}{da} = \frac{8}{E_s b} \left(\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right)$$

$$G_c = \frac{4P^2}{E_s b^2} \left(\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) = \frac{4P^2}{E_s b^2} m$$

E_s es el módulo de Young del sustrato y h el espesor

Estas expresión permitirán obtener el valor de G_c midiendo únicamente durante el ensayo los valores de la longitud de grieta en función de F, el resto de variables corresponde a las características geométricas y mecánicas de la probeta.

Sin embargo, la medida de la longitud durante el ensayo es bastante compleja y genera errores, por esto, se planteo usar el parámetro de apertura (δ) en lugar de la longitud.

○ Corrected Beam Theory (CBT):

Para DCB y TDCB lo encontramos en (Laserna Montoya, J. A. (2017)). Con la expresión de CBT se pretende corregir los efectos que se presentan en la teoría de SBT, donde se supone que el comportamiento de la probeta como viga es perfecto, sin tener en cuenta el efecto de la rotación. Este efecto es debido, como se vio anteriormente, a la plasticidad en la punta de esta grieta, lo que provoca una sobreestimación de G. Para solucionarlo, se trata como si su longitud de la grieta a fuese mayor a la real, se

empleará de esta forma una nueva longitud $a_{ef} = a + \Delta a$. El valor de Δa se tiene que obtener de manera experimental con una relación de flexibilidad de $C^{\frac{1}{3}}$ en función de la longitud:

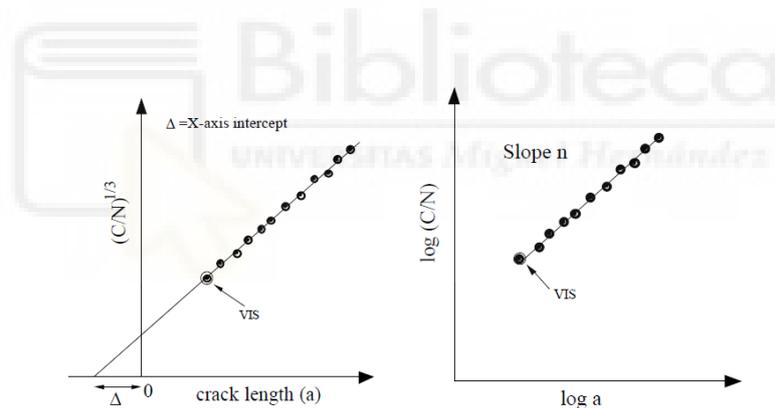
$$G_c = \frac{3P\delta}{2b(a + \Delta a)}$$

En esta ocasión se deberán medir las magnitudes de a , la longitud de la grieta; δ referido al desplazamiento en la apertura y la carga P

- Experimental Compliance Method (ECM):

Consiste en este caso en los datos experimentales, se realizará una curva enfrentando el logaritmo de C/N y el logaritmo de la longitud a . La pendiente de esta curva (n) dará la expresión de tasa de energía de liberación:

$$G_c = \frac{nP\delta}{2hba}$$



II. Método de grieta equivalente:

De manera alternativa a los métodos presentados tanto para Modo I como para Modo II de fallo, surge por parte de Moura una nueva forma de expresar la energía de liberación: compliance-based beam method (CBBM). Como se explica en (De Moura, M (2008)), con esta nueva expresión se intenta solucionar la mayoría de los inconvenientes que se presentan en los modelos de la MFEL (medir la longitud de a y el enroamiento de la punta), aplicando la teoría de la zona cohesiva, se podrá hallar G únicamente con la ley de tensión-deformación. No es necesario medir la longitud de la grieta durante el ensayo, en su lugar se emplea la longitud equivalente, que se deriva de una relación teórica entre la carga y el desplazamiento, incluyendo los efectos de corte y flexión y se puede obtener por medio de ecuaciones en programas informáticos.

Además, la nueva longitud efectiva ya incluye el efecto de FPZ, por lo que tampoco requiere de corrección. Como método equivalente al de la longitud efectiva, también se va a desarrollar la del módulo de flexión equivalente (E_f). Para ello, Moura desarrollo una serie de expresiones a partir de la teoría de Irwin, introduciendo el concepto de módulo de flexión equivalente (E_f) o a_f , que se verán en (Chaves, F. J. P (2014); De Moura, M. F. S. F (2008)). Para el modo de fallo I tendremos la expresión:

Partiendo de la expresión de Irwin:

$$G = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}$$

-Para la probeta de DCB:

Mediante la teoría de Castigliano que permite expresar la deformación δ , y dividiendo entre la carga, podremos obtener la ecuación para C :

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{8a^3}{Ebh^3} + \frac{12a}{5bhG}$$

La tasa de liberación de energía para E_f quedaría como:

$$G = \frac{6P^2}{b^2h^3} \left(\frac{2a^2}{E_f} + \frac{h^2}{5G} \right)$$

E_f corrige el problema de la apertura del frente de grieta (FPZ) y la rotación con $|\Delta|$.

$$E_f = \left(C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{5bhG} \right)^{-1} \frac{8(a_0 + |\Delta|)^3}{bh^3}$$

$$\Delta_I = b \sqrt{\frac{E_x}{11G} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]}$$

La tasa de liberación de energía para a_e quedaría como:

$$G = \frac{6P^2}{b^2h^3} \left(\frac{2a_e^2}{E} + \frac{h^2}{5G} \right)$$

La modificación de a_e se obtendrá como:

$$a_e = \frac{1}{6\alpha} A - \frac{2\beta}{A}$$

$$\alpha = \frac{8}{bh^3E}; \beta = \frac{12}{5bhG}$$

$$A = \left(\left(-108\gamma + 12 \sqrt{3 \left(\frac{4\beta^3 + 27\gamma^2\alpha}{\alpha} \right)} \right) \alpha^2 \right)^{\frac{1}{3}}$$

2.3.3.2. MODO II: ENERGÍA DE ROTURA A CORTADURA

- GEOMETRÍA:

Corresponde a una separación tangencial (δ_t) por la acción única de una tracción normal (τ_t). En el artículo de (Chaves, F. J. P (2014)) se comenta ya que no existe un sistema propiamente estandarizado para el modo II, pero sí que hay ciertas pruebas que están más extendidas que otras. Como se encuentra en el documento (De Moura, M. F. S. F (2008)) existen tres tipos de ensayos que son los más habituales en las diferentes pruebas que se recogen en los artículos, si bien, como se verá más adelante, existen también otras alternativas:

- End-Notched-Flexure (ENF)

Su geometría cuenta con dos vigas actuando de sustrato, unidas por medio del adhesivo, en esta línea de adhesivo se puede dejar un hueco final, actuando como concentrador de tensiones como en (Chaves, F. J. P (2014)) o bien llevarlo hasta el final. Para lograr el esfuerzo cortante en la unión, el conjunto de la probeta se somete a una flexión por tres puntos de apoyo (Ilustración 41).

El método de ENF es el más sencillo tanto en su geometría como en la aplicación de la carga, además, está bastante extendido. No obstante, algunos autores lo descartan debido a la complejidad que se presenta a la hora de medir la cizalladura en el adhesivo, sumado además a un inicio de la grieta muy inestable, como vemos en los trabajos (Hasegawa, K (2015); De Moura, M. F. S. F (2008)).

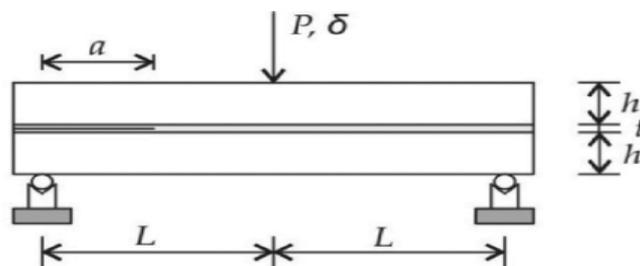


Ilustración 41: Probeta de End-Notched-Flexure. Chaves, F. J. P (2014)

- End-Loaded-Split (ELS)

Comparte la geometría de doble viga unida por medio del adhesivo con la prueba de ENF, sin embargo para este ensayo la viga en lugar de estar bi-apoyada será empotrada en uno de sus extremos, al dejar libre el otro se podrá aplicar una carga para

generar los esfuerzos cortantes. El adhesivo puede bien tener una pre-grieta o ser completo. (Ilustración 42)

En el caso de ELS, en el trabajo (De Moura, M. F. S. F (2008)), se solucionan algunos inconvenientes de ENF, permitiendo un inicio de grieta más estable y es además elegido por ESIS. No obstante también se muestran algunos inconvenientes en los trabajos de (Chaves, F. J. P (2014); De Moura, M. F. S. F (2008)), como la dificultad de emplearse en grandes deformaciones, la correcta sujeción o los deslizamientos verticales. Para corregirlo tendrá un factor de correcciones.

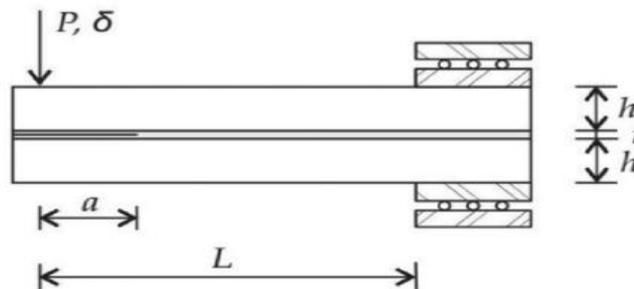


Ilustración 42: Probeta de End-Loaded-Split. Chaves, F. J. P (2014)

- o 4 End-Notched-Flexure (4ENF)

La geometría es idéntica a un ENF, pero en esta ocasión la carga se aplica sobre la viga bi-apoyada por medio de dos puntos de acción.

Como se expone en (De Moura, M. F. S. F (2008)), esta combinación proporciona un avance estable de la grieta y de fácil análisis. El problema resultante de este método es la elevada fricción que se genera en esos dos apoyos, como se comenta en (Chaves, F. J. P (2014)), la sensibilidad ante la no linealidad, así como la dependencia de geometría en la medida de la tenacidad.

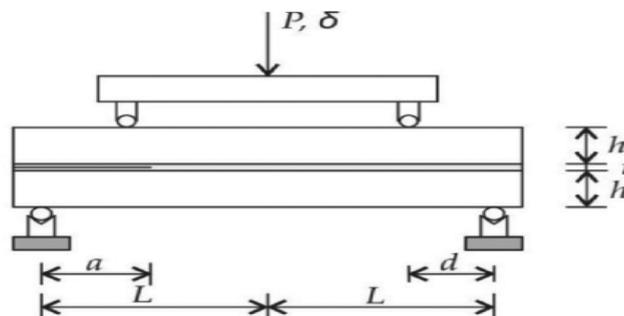


Ilustración 43: Probeta de 4 End-Notched-Flexure. Chaves, F. J. P (2014)

○ SLJ o TAST

De una forma alternativa a las geometrías anteriores, algunos autores han optado por simplificar las probetas y emplear las que ya hemos visto anteriormente, conocidas como SLJ o TAST. De esta forma tenemos el caso de (Niu, R.-M (2014)) con la probeta de tipo SLJ, modificada con una pre-grieta para provocar, al ser sometida a la tracción normal, a una separación de modo II. Al igual que este, (Hasegawa, K (2015)) empleará la geometría de TAST, bastante similar a la de SLJ, también con la modificación necesaria para llegar a provocar una rotura de modo II.



Ilustración 44: Probeta de TAST y SLJ. Sasso, M (2008); Amstutz, C (2018)

• OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA MODO II:

I. Método de reducción de datos:

○ Compliance Calibration Method (CCM):

Al igual que con los métodos anteriores, la ecuación para la obtención de la energía de liberación en el modo II deriva de la ecuación general de Irwin-Kies:

$$G = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}$$

Para el caso de las probetas de ENF y ELS la relación entre la flexibilidad y la longitud se da mediante $C = D + ma^3$

$$G = \frac{3P^2 ma^2}{2b}$$

Sin embargo para las probetas de 4ENF la relación será $C = D + ma$

$$G = \frac{P^2}{2b} m$$

En este caso, se elimina la necesidad de medir la longitud de la grieta (a), siendo por tanto un método experimental más sencillo.

○ Corrected Beam Theory (CBT):

A partir de la teoría de vigas se desarrollaron una serie de modificaciones para tener en consideración los efectos de deformación en estas debido al cortante, podemos

encontrar esta expresión en (Chaves, F. J. P (2014); De Moura, M. F. S. F (2008); Blackman, B. R. K (2003)). La expresión propuesta por Wang and Williams:

ENF

$$G_c = \frac{9(a + 0.42\Delta_I)^2 P^2}{16b^2 E_x h^3}$$

La variable de Δ_I hará referencia a la corrección de longitud de grieta, que se obtendrá

con la expresión $\Delta_I = t_p \sqrt{\frac{E_x}{11G_{yx}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma} \right)^2 \right]}$ siendo G_{yx} el modulo de cortadura y

$$\Gamma = 1.18 \sqrt{\frac{E_x E_y}{G_{yx}}}$$

ENL

$$G_c = \frac{9(a + 0.49\Delta_I)^2 P^2}{4b^2 E_x h^3}$$

4ENF

$$G_c = \frac{9P^2 d^2}{16b^2 E_x h^3}$$

- Direct Beam Theory (DBT):

Es una variación del método de SBT aplicado a las fracturas de modo II, a partir de la ecuación de Irwin se obtiene como se ve en (Chaves, F. J. P (2014)):

ENF

$$G_c = \frac{9P^2 a^2}{16b^2 E h^3}$$

ENL

$$G_c = \frac{9a^2 P^2}{4b^2 E h^3}$$

II. Método de grieta equivalente:

Como para el caso del modo I, aplicando la teoría de vigas a la ecuación de Irwin tendremos:

- Para la geometría de ENF:

$$G = \frac{9P^2 a^2}{16b^2 E h^3}$$

Para introducir el efecto del FPZ, se propone a partir de la teoría de Timonsenko C como:

$$C = \frac{3a_e^3 + 2L^2}{12E_f I} + \frac{3L}{10Gbh}$$

Aplicando el modulo de flexibilidad corregido:

$$E_f = \frac{(3a_0^3 + 2L^3)}{12I} \left(C_0 - \frac{3L}{10Gbh} \right)^{-1}$$

$$a_e = a + \Delta a_{FPZ} = \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$C_{corr} = C - \frac{3L}{10Ghb} \text{ y } C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10Ghb}$$

La tasa de liberación de energía quedaría de la forma:

$$G = \frac{9P^2}{16b^2 E h^3} \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{\frac{2}{3}}$$

- Para la geometría de ENS

De Moura propone la ecuación para C como:

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{3a^3 + L^3}{2Ebh^3} + \frac{3L}{5Gbh}$$

$$a_e = \left[(C - C_0) + \frac{2bh^3}{3} a_0 \right]^{\frac{1}{3}}$$

La ecuación de la tasa de liberación de energía quedará como:

$$G_c = \frac{9a_e^2 P^2}{4b^2 E h^3}$$

2.3.4. MECÁNICA DE DAÑO:

Intentando resolver los inconvenientes y dificultades que se han planteado con el método anterior, se desarrollo esta nueva teoría, capaz de explicar el comportamiento del material desde el inicio de la grieta hasta la rotura, combinando el modelo de medios continuos y la mecánica de fractura. Este enfoque podrá emplearse para predecir la rotura del material representando el daño generado por una carga en el deterioro de las propiedades del material, mediante una ecuación constitutiva. El uso de esta teoría está fundamentado en la capacidad que tiene para poder explicar tanto la respuesta de

materiales frágiles como dúctiles, bajo cargas complejas, de fatiga e incrementos del daño que minora su resistencia. Existen dos formas de evaluar el daño progresivo que tiene lugar en este tipo de materiales, como son los adhesivos: modelo de zona cohesiva (CZM), donde el fallo está localizado a lo largo del plano; y el modelo de daño continuo (CDM), que el daño tiene lugar a través del material. El primero (CZM) será más directo de aplicar para el fallo interfacial y el fallo del adherente, sin embargo el segundo será para el fallo cohesivo dentro de la capa de adhesivo, sobre todo para fallos con zona de daño muy grande. El problema reside en la gran capacidad del modelo de zona cohesiva para representar el comportamiento de grandes estructuras, mientras que el de daño continuo únicamente para algunos tipos de adherentes concretos. Dado esta mayor extensión del método cohesivo, en este trabajo únicamente vamos a considerar este, dejando el daño continuo para otros estudios más extensos.

2.3.4.1. MODELO DE ZONA COHESIVA

En la segunda mitad del siglo XX fue desarrollado por Barenblatt en 1962 y Dugdale en 1960, el modelo Leyes Cohesivas para los procesos no lineales del frente de grieta. En el trabajo de (Chaves, F. J. P (2014)) se expone como este enfoque va a solucionar algunos de los inconvenientes de las teorías anteriores: es fenomenológico, por lo que no es necesario detallar el proceso físico de la falla del material, en su lugar, se debe conocer la zona donde se vaya a producir el daño y poder determinar los elementos cohesivos.

En esta nueva teoría se considera que la capa cohesiva, basada en elementos para caracterizar la interface entre los dos sustratos, no tiene espesor y simula la unión entre dos sólidos. De esta forma es posible simular el inicio y propagación de la grieta sin ser necesaria la existencia de una pre-grieta o bien aquellas donde la agudeza no es muy grande. El comportamiento de esta zona cohesiva se caracterizará con una Ley de Tracción-Separación, que relaciona las tensiones cohesivas con el desplazamiento por la separación de los sustratos, independiente del daño que se produzca en la unión. Además, resulta muy conveniente para aquellos casos donde se pretenda estudiar los efectos del espesor, viendo el comportamiento de FPZ en la punta de grieta, como causante de micro-grietas, procesos inelásticos, etc.

La modelización del comportamiento de esta capa se puede llevar a cabo mediante tres técnicas: como una interface entre dos cuerpos unidos, donde se ignora el efecto del

espesor; como una capa cohesiva continua elasto-plástica con parámetros de fractura, teniendo en cuenta el volumen; o la capa cohesiva como una interface con espesor, que describe la respuesta macroscópica. En el caso de las uniones adhesivas que estamos estudiando, la modelización más precisa será la segunda, sin embargo requiere de una gran complejidad numérica, necesitando de una complementación de los parámetros de fractura con parámetros del material en masa, como elasticidad o plasticidad. Por esto, se determina la tercera técnica como un punto de equilibrio entre las otras dos.

Como se expone en (Kregting, R. (2005)), los elementos de la zona cohesiva no representan ningún material físico, pero serán capaces de describir las fuerzas que tienen lugar entre los elementos del material en el proceso de rotura. A medida que ocurre el daño, los elementos de zona cohesivos se abren simulando el inicio y propagación de la grieta, por lo que es importante que estén dispuestos en la zona donde se supone que esta crecerá. Esta es una de las mayores limitaciones de este modelo, los elementos cohesivos deben disponerse en la zona por donde crece la grieta, que en ocasiones no es fácil de predecir.

- Ley cohesiva:

Como se dijo anteriormente, la caracterización de la unión se llevara a cabo con la curva o ley de tracción-separación, esta consta de tres tramos, en el primero el material aumenta la resistencia mientras crece el desplazamiento; en la segunda se alcanza un máximo, conocido como el valor de tracción máxima o separación crítica (t_{max}), punto donde tiene lugar el daño y a partir de los cuales se sucede el fallo del material durante la tercera etapa. De esta curva podrá obtenerse el esfuerzo de cortadura y tracción máximo (t_n o t_s), la separación crítica (δ_n) y con el área bajo la curva, que representa el trabajo disipado durante la separación del material, la energía de rotura o energía de separación (G), extraída de la teoría básica de Griffith.

La teoría genérica de esta Ley de Tracción-Separación se deriva del primer tensor de Piola-Krichhoff, que representa el vector de tracción sobre la superficie cohesiva, con una componente normal (T_n) y otra tangencial (T_t):

$$T = - \frac{\partial \phi(\Delta)}{\partial (\Delta)}$$

Δ representa la separación, que puede darse en tres formas distintas, dependiendo del tipo de estado de tensión que el sólido experimente ante la rotura (Aranda-Iglesias, D(2017)): separación normal a la superficie de la interface δ_n , separación tangencial δ_t

o separación tangencial en dos direcciones δ_t y δ_s . A estas separaciones van asociadas una tensiones, también normales y tangenciales, la combinación de una separación con una tensión dan lugar a los tres modos de falla conocidos como I, II y III. Al tratarse de un modelo fenomenológico, la forma de la curva t (f) no está definida y es independiente del material empleado, por lo que cada autor va a emplear diferentes formulaciones, las más representativas son:

- Ley cohesiva polinomial: polinomio de tercer grado para materiales dúctiles en modo normal. Por Needleman en 1987. Figura 37^a.
- Ley cohesiva exponencial: para materiales dúctiles (Siegmund y Brocks 1998) y frágiles Por Xu y Needlman en 1993. Figura 37c.
- Ley cohesiva rígido-lineal, lineal o lineal decreciente: para los materiales frágiles Por Hiller-borg en 1976. Figura 37d.
- Ley lineal fragmentada, multilineal o trapezoidal: es la más versátil, sirve para cualquier tipo de material. Por Scheider en 2000. Figura 37b.

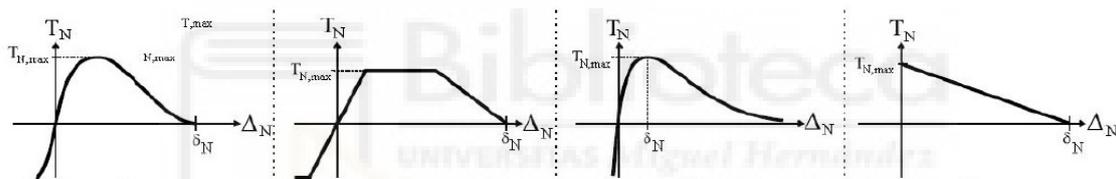


Ilustración 45: Diferentes curvas de modelo cohesivo. García Garino, C. G (2013)

Además de estas curvas, es importante incorporar la dependencia de la historia de cargas. Después de sufrir una carga, si el material se descarga, para el siguiente ciclo de carga, debido a los daños irreversibles la curva no puede ser igual. Esta descarga se representa como una recta de vuelta al origen y se introducirán en la formulación distintos parámetros para controlar la historia de cargas. En (Kregting, R. (2005)) se presentan hasta tres de estos modelos de historia de cargas: desacoplada, y dos formas acopladas; el significado de esto es que las ley de tracción normal sea dependiente o no de la separación tangencial y la ley de tracción tangencial sea o no dependiente de la separación normal.

- Crecimiento de grieta en la zona cohesiva:

Como se exponía anteriormente, el proceso de crecimiento de la grieta en este modelo de estudio se puede obtener de la ley de tracción-separación. A partir del punto de máximo desplazamiento (máximo en la curva), el crecimiento tendrá lugar en la zona de proceso de fractura (FPZ), como se expone en (De Moura, M. F. S. F (2008)), debido

a la combinación de efectos de plasticidad y microgrietas. En (Elmukashfi, E (2013)) se ha visto como la zona de crecimiento de la grieta para la teoría de zona cohesiva presenta tres regiones diferentes. Estas zonas se deben al comportamiento viscoelástico presente en los materiales como el caucho: zona gomosa, zona de disipación viscosa y zona vidriosa. En (Ilustración 46) se puede apreciar como las aéreas van desde la punta de la grieta hacia afuera, pasando de una fase cristalina a una gomosa, se produce un ablandamiento. Entre la zona vidriosa y la gomosa se encuentra la visco-elástica, que representa el lugar donde tiene lugar la disipación de esta energía.

También en (Elmukashfi, E (2013)) se muestra el proceso de la zona cohesiva en la grieta respecto la ley de tracción separación

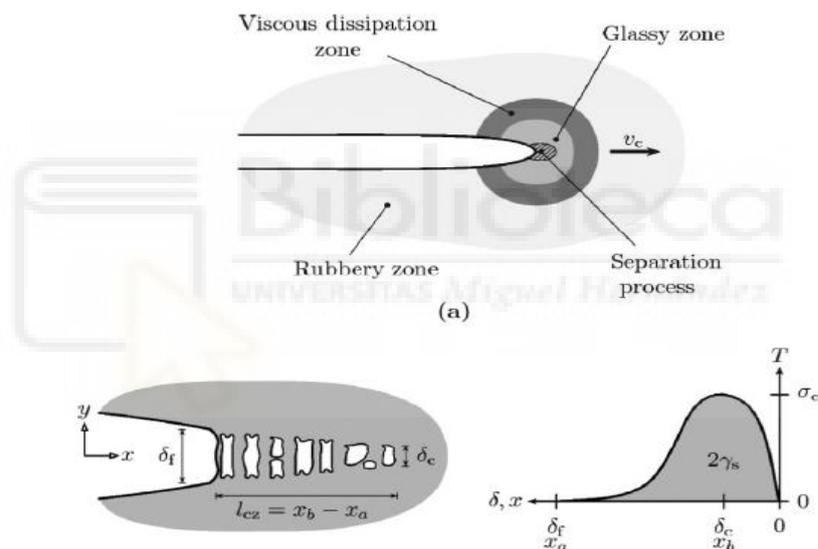


Ilustración 46: Crecimiento de la punta de grieta en zona cohesiva. Elmukashfi, E (2013)

- Parámetros de la zona cohesiva

La teoría de la zona cohesiva permite caracterizar el proceso de rotura en una grieta, para poder elaborar la ley cohesiva que describe el comportamiento en la zona cohesiva es necesario una serie de parámetros que son exclusivos de este modelo, además de otros parámetros del material. Estos parámetros se distinguen en: energía cohesiva (G_c), esfuerzo cohesiva (t_n^0) y rigidez inicial. Existen tres métodos bastante extendidos para la obtención de estos parámetros: método directo, método inverso e identificación de propiedades. Estos se han mostrado en trabajos como (De Moura, M. F. S. F (2008); Niu, R.-M (2014); Carvalho, U. T. F (2016)).

- El método de las propiedades consiste en la estimación individual de cada uno de los parámetros con ensayos. Resulta poco válido para el caso de determinación de las propiedades de adhesivos en masa, ya que existen diferencias en función del espesor empleado de adhesivo.
- El método inverso es un proceso iterativo para hacer coincidir los resultados de los ensayos con los numéricos, determinando de manera inversa los parámetros desde la curva de carga-deformación (P-d). Presente en (De Moura, M. F. S. F(2008))
- El método directo ofrece un reflejo exacto de la forma de la ley cohesiva.

Los métodos directo e inverso son más adecuados debido a que se tiene en cuenta el espesor del material. Para el caso de la energía cohesiva, que es el más importante, se podrá emplear técnicas de la MFEL, para el caso de no tener mucha ductilidad, o bien la expresión de J-integral para los que si la presentan.

Además de servir para evaluar la rotura en adhesivos cuando la MFEL no puede ser utilizada, la teoría de la zona cohesiva servirá para el mecanismo de fractura dinámica o lo que es lo mismo, la fatiga. Mediante la relación de tracción-separación que se empleaba antes y un parámetro para establecer el daño que se genera en la unión que va reduciendo progresivamente la rigidez, se podrá simular el crecimiento de la grieta en este caso. El comportamiento del elemento cohesivo se describe como:

$$\begin{aligned}\sigma &= K^0 \delta \text{ para } 0 < \delta < \delta^0 \\ \sigma &= (1 - D)K^0 \delta \text{ para } \delta^0 < \delta < \delta^c \\ \sigma &= 0 \text{ para } \delta^c < \delta\end{aligned}$$

Siendo δ es el valor del desplazamiento entre las caras cohesivas, D el parámetro de daño, δ^0 el desplazamiento hasta el ablandamiento y δ^c el desplazamiento hasta el fallo, K^0 la rigidez y σ la tracción. De todas las variables presentadas, la de daño será la que tenga interés en esta parte, por lo que va a ser estudiada y presentada de forma muy distintas entre diversos autores.

En el siguiente apartado se realizará un análisis de las diferentes enfoques que han dado algunos autores a la hora de estudiar los adhesivos, recorriendo toda esta teoría que se ha presentando y empleado la que mejor les ha parecido en cada caso.

- Modelo de zona cohesiva en la bibliografía:

A partir de este punto, el uso de la teoría de la zona cohesiva es ampliamente usado para la caracterización del frente de grieta y numerosos autores han dado cuenta de ello en sus trabajos. La teoría de la zona cohesiva forma parte de la mecánica de daño y se basa en estudiar el proceso de separación en la grieta a través de una ley de tracción-separación, que puede tener diferentes representaciones. En el último siglo el uso de este método ha sido muy aceptado entre los diferentes autores a la hora de caracterizar el proceso de crecimiento de la grieta, ligado también a su utilización en programas de elementos finitos.

En el artículo (Hui, C.-Y (2003)) se expone como ya se ha visto anteriormente, la existencia de una parte de la energía que se usa para la rotura y otra que se disipará en forma de efecto visco-elástico. Así se parte de la teoría de Lake y Thomas, donde se asume que en la punta de la grieta existe un comportamiento del material no lineal.

Para determinar la energía de la adhesión o cohesión emplea el modelo de la zona cohesiva, con las fuerzas normales y de corte. Se explica de manera detallada como para el caso de los elastómeros, un material elástico y blando, antes de que tenga lugar la rotura en el proceso de tracción separación, ocurre un enroamiento del frente de grieta, debido a las grandes deformaciones que sufren cuando la tensión excede el módulo elástico. Esta zona se podrá introducir dentro de la teoría cohesiva cuando se de la cavitación o las microgrietas, que harán crecer la fractura. El crecimiento se debe a que en esta zona se da una gran deformación y el módulo es mucho más grande que el que presenta el material.

Es necesario conocer en qué punto de la grieta el comportamiento deja de ser lineal elástico. En este sentido, Ghatak en el 2000 retomó la teoría anterior para aplicarle el modelo de la zona cohesiva, propuso un modelo cohesivo de apertura de la grieta sobre la resistencia de las cadenas al desplazamiento en la grieta como $f = k_s \delta$, siendo k_s la constante elástica de las cadenas de polímero. La energía requerida ahora para propagar la grieta tendrá la forma:

$$G = \frac{1}{2} \Sigma_0 k_s \delta_{max}^2$$

Esta expresión es una aproximación de la teoría inicial de Thomas y Lake, donde $\frac{1}{2} k_s \delta_{max}^2$ es aproximadamente igual que nU y Σ_0 refiere a la energía requerida para la propagación por unidad de área, el trabajo para estirar las cadenas en esta unidad hasta

el final. Este estudio del crecimiento de grieta con la zona cohesiva resulta bastante aceptable, en el comportamiento no lineal en el frente de grieta, de este punto surge la necesidad de establecer cuál es la longitud de esta zona cohesiva. Como se sabe que fuera la esta zona el material vuelve a tener un comportamiento lineal, la longitud va a poder derivarse a partir de la ley de MFEL de Griffith (Hui, C.-Y (2003)):

$$L = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_f^2}$$

Siendo $\sigma_f = \Sigma_0 k_s \delta_{max}$ la tensión de fractura de las cadenas.

Con respecto al modelo de zona cohesiva, se determinará el vector T, que será la tracción a lo largo de la zona cohesiva, con los componentes de apertura y cortadura. Se aprecia que la distribución de la tracción cohesiva en la zona de grieta, cuando la tensión es menor que el modulo E, la zona cohesiva se desarrolla como una pre-grieta.

La zona de enrolado se verá como una zona cohesiva con una modificación del esfuerzo cohesivo, que depende del material. Si la curvatura de la pre-grieta es menor que la zona cohesiva, no se dará el enroamiento, pero el radio muy pequeño genera un esfuerzo muy grande en la zona. Todo esto explica porque se puede usar la zona cohesiva para simulación y presenta buenos argumentos cuando el estiramiento es mucho menor que el supuesto mecánico, pudiendo tratar la zona como cohesiva y simplificando la energía como la apertura crítica por el esfuerzo.

Las razones por las que la zona puede crecer son la nucleación o la cavitación. La cavitación se da cuando la tensión hidrostática supera el modulo elástico. En segundo lugar se encuentra el crecimiento de microgrietas cerca de la zona. En materiales con un endurecimiento por una gran deformación, el modulo cerca de la punta es mucho más rígido que el material de alrededor, pudiendo así presentar microgrietas desde la punta, debido a este endurecimiento y la propagación de la grieta.

Con el fin de estudiar el efecto del enroamiento en la zona, el autor realiza un ensayo entre una zona roma y una zona de crecimiento de grieta normal. Con el incremento de la carga se monitoriza la grieta, a determinada tensión crítica esta comienza a crecer. Se concluye que en los materiales suaves, las grandes deformaciones generan zonas romas que puede evitar el crecimiento de la grieta debido a la suavización de la magnitud de la concentración, si la resistencia cohesiva en este punto supera el modulo E, dará lugar a un nuevo modelo de falla con una mayor energía. Tendremos entonces que el fallo cohesivo en los adhesivos se da con una a menor a la máxima, sin embargo, el fallo de

interfaz se da cuando la a es mayor de la máxima, no se sabe que puede provocar el cambio entre los dos tipos de fallo, se propone la presencia de una grieta en la zona roma. La zona roma en los materiales blandos o en la interface con el sustrato rígido permite a los modos de separación meter el aumento de energía por la disipación, en estos materiales la zona roma aparece debido a grandes esfuerzos, cuando el modulo sea más pequeño que el esfuerzo cohesivo. En los materiales elástico la disipación se debe al proceso de enroamiento, gran parte de la energía de esta zona se pierde en la descarga. También cuando ocurre en la cavitación parte de la energía disipada se usa para crear la nueva superficie.

En (Turon, A (2007)) se opta por usar CZM para la formulación de elementos finitos, siendo este el método más común para el caso de fracturas interfaciales. Se asume en esta teoría que la zona de daño cohesivo se localiza cerca de la punta de grieta y necesita ser caracterizada por las propiedades del material en masa, las condiciones de inicio de la grieta y la evolución de esta. Como se ha expuesto antes, en teoría de CZM, el inicio del daño y su crecimiento viene representado por la ley de tracción separación y la energía liberada durante este proceso será el área bajo la misma curva. En el caso de Turon se obsta por emplear la relación bi-linear de esta ley.

A la hora de implementar la teoría de CZM en el programa de elementos finitos es necesaria la descripción completa del material, con las propiedades de fractura extraídas del modelo constitutivo de la superficie cohesiva, así como las propiedades en masa del material. En esta simulación es importante tener presente la importancia de la rigidez de la zona cohesiva y su longitud.

Posteriormente, Elmukashfi, (Elmukashfi, E (2013)) va a estudiar la propagación dinámica de la grieta con métodos de elementos finitos, haciendo nuevamente uso del modelo de la zona cohesiva. Expone la existencia de tres zonas alrededor del frente de grieta que se van a caracterizar en función de la frecuencia, justo en la punta existe un material vidrioso debido a los esfuerzos, seguido de otro viscoso y más lejos un material ya gomoso. Este modelo cohesivo es capaz de describir el proceso de fractura en la punta de la grieta como una separación gradual de las superficiales con esfuerzos normales y cortantes en la interfaz. Se definen en este trabajo el modelo constitutivo y el modelo cohesivo.

El modelo constitutivo: en el caso de las gomas, la caracterización se realizará con un modelo elástico e hiperelástico, sin embargo, para el caso de la respuesta dinámica, hará falta la caracterización viscoelástica. Este modelo viscoelástico define la función de energía libre como la suma de dos componentes, la volumétrica y la isotrópica.

$$\Psi = \Psi_{\text{iso}}(F) + \Psi_{\text{vol}}(J)$$

La parte isotrópica se define a partir del gradiente de deformación F , mientras que la parte volumétrica con la Jacobiana J . Esta parte isotrópica se define con un modelo hiperelástico, Ogden en este caso; mientras que la parte volumétrica corresponde a la presión hidrostática

El modelo de zona cohesiva: se representa con la conocida ley de tracción-separación, un modelo fenomenológico que puede ser extraído de la función densidad de energía libre, expresada como el tensor de Piola Krichhoff:

$$T = T(\Delta) = \frac{\partial \phi}{\partial \Delta}$$

En el caso de este trabajo se expresa como una ley bilineal para el caso de modo I y se obtendrán de esta los parámetros de K_n como rigidez elástica inicial, separación crítica, separación de fallo y esfuerzo cohesivo en dirección normal. Se explica la necesidad de conocer tanto el proceso de fractura como los parámetros de la zona cohesiva para su implementación numérica: la energía cohesiva y el esfuerzo cohesivo, que se emplearán junto con otras propiedades del material para determinar la longitud de la zona cohesiva. Para el caso de la energía cohesiva se va a tomar la energía de fractura total y el esfuerzo cohesivo de un ensayo de tensión.

En el posterior estudio de 2014, se expone de nuevo que la teoría para el estudio de la propagación dinámica de grietas en la goma se basará en la visco-elasticidad. De esta forma, el proceso de separación será estudiado con el modelo cohesivo, mientras que el comportamiento en masa con la teoría viscoelástica. Explica como la energía de desgarró ha sido empleada para el estudio de la fractura mecánica en elastómeros, esta energía contará con dos partes, una independiente de la velocidad (asociada a la rotura de enlaces) y otra que si depende (debido a la disipación en viscosidad). Tras ensayos a alta temperatura y baja velocidad para reducir los efectos viscosos y el uso de la micro-mecánica para estimar la energía de rotura de los enlaces, se concluye que la energía de una rotura es el trabajo necesario para crear una nueva superficie $2\gamma_s$ y la energía disipada por viscosidad alrededor de la punta de la grieta a medida que esta avanza. Lo

que fue observado por Elmskafi y Kroon es que existía otro tipo de disipación que estaba asociada a la cavitación y a la cristalización en la punta de grieta. Diferentes modelos cohesivos se emplean para modelar la propagación dinámica.

Al igual que en el trabajo anterior se desarrolla un modelo constitutivo a partir del gradiente de deformación F y la Jacobiana J y a partir de estos es posible expresar la función de energía libre inicial, con su parte isotrópica y volumétrica. Con respecto al modelo cohesivo, se elige el mismo que anteriormente, con el primer tensor de Piola descompuesto en dos efectos, dependiente de la velocidad y el independiente. De esta forma, en las curvas de tracción-deformación contaremos con dos representaciones diferentes y la energía será la suma de la integral bajo ambas.

Para la implementación numérica es de nuevo necesario conocer los parámetros materiales y el material gomoso. La parte de la separación estará modelada con la CZM y sus parámetros, como son el esfuerzo cohesivo, la energía cohesiva y la viscosidad.

2.3.5. MÉTODOS PARA LA CARACTERIZACIÓN HIPERELÁSTICA:

En la revisión de los distintos trabajos realizados por gran cantidad de autores, se ha podido apreciar que no todos hacen uso de los modos de fallo clásicos de la MFEL, modo I y modo II. Por el contrario, en muchas ocasiones, la energía de rotura se puede obtener de forma directa a partir de probetas de ensayos clásicos de tracción, compresión, pelado o desgarro. Algunos de los ejemplos más representativos son:

- Integral J:

Además del uso de la expresión de J integral en la mecánica a la fractura elasto plástica, en el artículo (Hocine, N. A (2002)) se exponen diferentes expresiones que se han ido desarrollando por numerosos autores a lo largo de los años para emplear sobre materiales con un comportamiento no lineal o hiperelásticos. Partiendo de las expresiones de Rivlin en 1953 y Thomas en 1955, que propusieron expresar la energía J como función de la densidad de energía de deformación uniforme en un material fisurado como un espécimen sin grieta y sometido a un ratio de estiramiento (longitud final/longitud inicial). Empleando una probeta de tipo SENT, desarrollan la expresión:

$$J = 2k(\lambda) W_{0\lambda} a$$

Siendo W_0 la función de densidad de energía remota en la grieta, a es la longitud de la grieta y k es una función de deformación $k(\lambda) = \pi\lambda^{-\frac{1}{2}}$

Para el caso de la probeta de cortadura pura, Rivlin en 1953, Rice en 1968 y Andrews en 1974 emplearon la expresión:

$$J = W_{0\lambda} h$$

Más tarde Andrews en 1974 introdujo la expresión:

$$J = 2k(W_0) W_0 a$$

Siendo W_0 la función de densidad de energía remota en la grieta y k la función sin dimensiones que depende del nivel de carga. Griffith en 1993 y Hocine en 1996 y 1998 introducen una modificación a esta expresión para el caso concreto de las gomas, introduciendo los efectos geométricos como $F(a/w)$:

$$J = 2k(W_0)W_0 a F\left(\frac{a}{w}\right)$$

Por último se expone en este trabajo de (Hocine, N. A (2002)) la formulación de J con el factor η para los materiales elasto-plásticos. De esta forma se descompone la integral en la suma de dos partes:

$$J = J_{el} + J_{pl} = \eta_{el} \frac{U_{el}}{B(w-a)} + \eta_{pl} \frac{U_{pl}}{B(w-a)}$$

Al igual que para el caso del resto de teorías, ya sea la energía de desgarro o la energía de Griffith, en la integral J existe un valor límite a partir del cual crece la grieta, se expresa como J_c . Siguiendo la teoría ya expuesta, en (Joe, C. R (1990)) se expone esta energía límite como:

$$J_c = -\frac{1}{B} \frac{\Delta U_c}{\Delta a}$$

Donde B es el espesor de la muestra, U_c el área bajo la curva de carga hasta la rotura y a la longitud de la grieta. Es posible obtener el valor de energía crítica a partir de dos muestras de pantalón con distinta longitud de grieta, es decir, un parámetro experimental. Este valor es equivalente a la tenacidad a la fractura o la energía crítica de desgarro (T_0). Algunas formas de determinarlo por medio experimental han consistido en ensayos experimentales de tracción evaluando la curva de carga-deformación, como en (Joe, C. R (1990)) con un ensayo de desgarro para determinar la curva R del desplazamiento-carga, o como se expone en (Arana, J. L (s.f); Joe, C. R (1990)) por medio de la curva de resistencia R para la integral J .

- Teoría de Tearing:

El modelo de la energía de desgarro o Tearing fue propuesto por Rivlin en 1953, Thomas en 1955 o Greensmith en 1955, derivado de la teoría propuesta por Griffith, como un potencial de energía por unidad de área. Con esta expresión podrán determinar la energía liberada en la fractura por el crecimiento de la grieta sin necesidad de evaluar la zona alrededor de esta. Sin embargo, como se expone en (Dragoni, E (1988)), presenta algunas limitaciones debido a su gran complejidad de aplicación en las geometrías complejas. La expresión general derivada de la teoría de Thomas y Rivlin será:

$$T = -\left(\frac{\partial U}{\partial A}\right)$$

Esta energía se podrá obtener de manera experimental midiendo la carga-deformación, pero también calculado por medio de la deformación aplicada, para el caso de una muestra con una grieta de longitud c , se podrá obtener la expresión $T = 2KW_c$, donde W_c es la densidad de energía del material y K es la función de variación de deformación. De esta forma, mediante la realización de ensayos experimentales, Bateman en 1963 y Gent, Lindly and Thomas en 1964, expresaron que esta energía era independiente de la geometría del material, únicamente depende de las propiedades de este. De estos ensayos se deriva la existencia de un valor límite T_0 por Lake y Lindley en 1965. El valor de esta energía se toma como una constante característica de cada material y es debida a la rotura de los enlaces de las cadenas en la fractura, por tanto, será proporcional al número de estos (n). De esta forma tomando U como la energía de rotura de un enlace, nU será la energía en función de las cadenas. Sin embargo, se observa que el valor de T_0 es mucho mayor que esta energía de rotura. Este incremento es debido a la deformación que se da en las cadenas y que cesa tras la ruptura de los enlaces. Se obtendrá por tanto un valor de T_0 como en el trabajo de (Lake, G. J (1967)):

$$T_0 = \frac{1}{2}LNnU$$

Donde nU es el número de cadenas por la energía de cada una y $\frac{1}{2}LN$ es la mitad de la longitud por el número de cadenas en unidad de volumen.

En (Thomas, A. G. (1994)) se establece una relación entre la energía de desgarro y la integral J a través de la expresión para determinar la energía elástica en el proceso de

crecimiento de una grieta. Sabemos que cuando esto ocurre se da tanto una energía de rotura de los enlaces, como una disipación por la relajación del material tras la rotura. La expresión para determinar la energía elástica será:

$$T = -d \int_0^{\pi/2} W_{\phi} \cos\phi \, d\phi$$

A la hora de determinar esta energía existen gran cantidad de artículos donde se han evaluado diferentes ensayos:

En el artículo (Guo, H (2019)) se presentan la mayoría de los ensayos más empleados, se pretende evaluar en este los diferentes métodos de caracterizar los tamaños de los inicios o precursores de grieta. Para ello el el autor realizan un total de 4 ensayos distintos para obtener la energía de desgarro: test de desgarro plano (Figura 47a), test de ángulo de desgarro (Figura 47b), test de desgarro de pantalón (Figura 47c) y test de tensión simple, donde hará uso de la teoría de mecánica a la fractura. Siendo por ello es un buen ejemplo de los ensayos más comunes a la hora de obtener T.

- Nicked Angle Tear Test : según la norma ISO 34-1:2010
- Planar Tear Test: un espécimen de tensión plana con una pregrieta.
- Trouser Tear Test: según la norma ISO 34:2010.
- Simple Tension Test: esta para obtener las propiedades del material según ISO 37:2011.

De esta forma es capaz de obtener la energía de rotura mediante las probetas más simples de la caracterización mecánica.

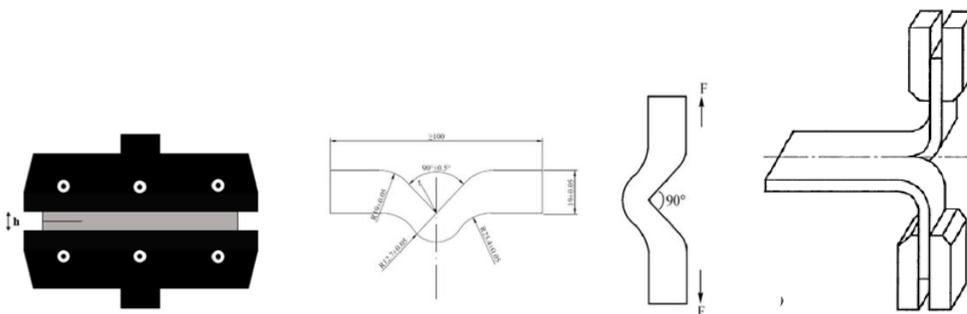


Ilustración 47: Probeta de tensión plana y desgarro. Guo, H (2019)

La expresión general y a partir de la cual se derivan el resto de ellas para cada ensayo parte de la energía de desgarro en una deformación uniaxial:

$$T = \frac{2\pi W_c}{\sqrt{1 + \epsilon}}$$

Siendo W la densidad de energía de deformación y ϵ la elongación.

Otros ensayos se han llevado a cabo en esta línea en artículos como (Hocine, N. A(1998)), el autor va a efectuar los ensayos experimentales para el modo de rotura I con las probetas de SENT y DENT, que no son más que unas probetas de adhesivo para tracción uniaxial a las que se les ha generado una pre-grieta para que ocurra el fallo.

- Cizalladura Pura
- Single Edge Notched in Tension (SENT)
- Double Edge Notched in Tension(DENT)

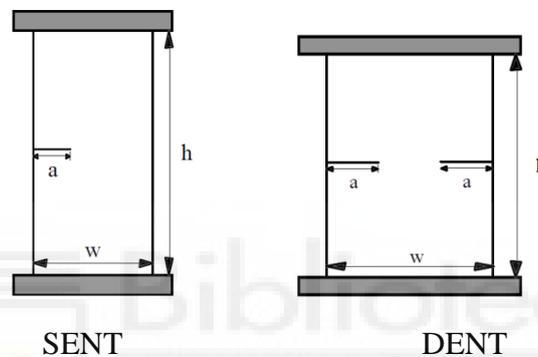


Ilustración 48: Probeta de SENT y DENT. Hocine, N. A (2002)

En (Yin, L (2020)) se realiza un método experimental basado en la probeta de hueso de perro según ISO 37-2005. En primer lugar se obtendrán las propiedades del material mediante un ensayo de tracción, la densidad de energía mediante la curva de tensión deformación con esta misma probeta y finalmente se evalúa el crecimiento de la grieta por fatiga realizando una pre-grieta en el centro del espécimen y sometiéndola a los ciclos de carga necesarios

- Modelo con límite energético

Como ya se ha expuesto antes, se habla de la función de energía libre o lo que es lo mismo, la energía de deformación del material. Este concepto está ampliamente estudiado por Volokov en la última década.

En (Volokh, K. (2007)) define la energía de deformación de un material hiperelástico como $\Psi = W$, es decir, la energía de deformación del material con comportamiento hiperelástico es equivalente a la función de densidad de energía, ya vista anteriormente, que se obtiene del material en forma intacta. Sin embargo, lo que se da cuenta Volokov

en este punto es que, para los modelos hiperelásticos desarrollados hasta el momento, esta energía era proporcional a la deformación, de manera que para una deformación infinita, la acumulación de energía en el material también lo sería. Sin embargo, esto no es para nada representativo del comportamiento en materiales reales, por lo que debe existir un límite en la energía.

De esta forma Volokov va a desarrollar este concepto de energía libre con una energía límite que se alcanza para una determinada deformación y ya no puede seguir aumentando por mucho que el material se deforme. Esta energía puede considerarse por tanto la energía en el momento de fallo. De esta forma se presenta una analogía con la mecánica a la fractura clásica, con una constante del material que describe el fallo, sin embargo, destaca que mientras que en esta mecánica clásica depende de la longitud en el fallo por la introducción de una energía de superficie, en el modelo de Volokov no será así. A partir de esta definición, el autor quiere desarrollar una expresión de carácter universal para poder incluir a los modelos ya existentes, que ya eran capaces de describir correctamente el comportamiento del material, introduciendo esta energía límite para cuando alcanza cierta deformación. Se plantea entonces la expresión:

$$\Psi(W) = \phi - \phi \exp(-W/\phi)$$

Tras esto, va a emplear esta teoría en diferentes tipos de ensayos para la calibración (uniaxial y cortadura) y modos de fallo de los elastómeros: cavitación, inflado de balón o paredes arteriales, además de establecer una energía crítica de fallo ϕ .

En el siguiente trabajo presentado en 2008 (Volokh, K (2008)) se habla de la existencia de dos enfoques para la modelización del fallo: de superficie o de material en masa. El primero fue presentado por primera vez por Barenblatt (1959) y es estudiado a día de hoy con el modelo de CZM, este método resulta bastante natural para la simulación de fracturas en el interior de la interfaz del material en policristales, composites o multicapas, sin embargo, para el comportamiento de los materiales en masa o su fractura no lo es tanto, ya que requiere de la simulación conjunta de dos modelos para el mismo material: uno que describa el material en masa y otro que describa CZM en el material en masa. Por esto, es más conveniente la introducción de un modelo de fallo directamente en el material en masa.

El primer modelo de fallo en masa fue introducido por Kachanov en 1958 y Rabotnov (1963) para el análisis del fallo gradual acumulado y su propagación. La necesidad de explicar la acumulación de fallo deja ver el gran parecido entre la mecánica de daño y la

teoría plástica con la variable de daño interno, el límite crítico y la evolución del daño. En los siguientes estudios se emplea el daño mecánico, desarrollados por los autores Kachanov en 1986; Krajcinovic en 1996; Skrzypek and Ganczarski en 1999; Lemaitre and Desmorat en 2005, para la descripción de la falla en el material en masa. Como alternativa ante esto Gao and Klein en 1998 y Klein and Gao en 1998 consideran el fallo como la rotura de enlaces, lo que requiere de una gran computación numérica. Finalmente como alternativa a esto, Volokov propone su modelo de energía límite y en este trabajo de 2008 se va a incorporar el efecto viscoso al modelo hiperelástico, contando con un comportamiento visco-hiperelástico.

Este nuevo modelo se va a ensayar para pequeñas deformaciones en cizalladura simple y para deformación finita en tensión uniaxial. Pese a lograr buen resultado en estas dos, se concluye que para las grandes deformaciones, la acumulación de deformación inelástica hace necesario el uso de la mecánica de daño.

En el posterior estudio realizado en 2010 (Volokh, K. (2010)) va más allá y estudiará el caso de las roturas de enlaces más abruptas, con una agudeza mucho mayor en el material. Para esto se va a presentar una nueva expresión, modificación de la expresada en 2007:

$$\psi = \frac{\phi}{m} \left\{ \Gamma \left(\frac{1}{m}, 0 \right) - \Gamma \left(\frac{1}{m}, \frac{W^m}{\phi^m} \right) \right\}$$

Donde m es una constante del material que controla la agudeza y Γ la función gamma incompleta superior. De esta expresión se obtiene un valor límite de la energía de fallo con la forma $\Gamma \frac{\phi}{m} \left(\frac{1}{m}, 0 \right)$. Tras los ensayos de esfuerzo plano con NR y SBR con los modelos hiperelásticos de Ogden y Yeoh se encontraron buenos resultados, que muestran una magnitud constante de la energía de deformación como criterio de fallo, pero esta no será exactamente la energía completa de separación $\Gamma \frac{\phi}{m} \left(\frac{1}{m}, 0 \right)$, ya que el fallo se da algo antes de la total separación.

En los estudios de 2017 (Volokh, K. (2017)) se va a emplear toda la teoría vista en los anteriores artículos para analizar los diferentes fallos en la goma: inflación y rotura, cavitación, grietas, fractura dinámica y fallas puntuales. Se podrá emplear la energía límite como criterio de fractura en estos fallos.

En (Aranda-Iglesias, D (2017)) se explica que fue Volok en 2008 el primero en introducir la viscoelasticidad a la formulación de la energía límite. Sin embargo, esta es limitada y sería necesaria una formulación de no-linear visco-elástica más amplia. Por eso en su trabajo se van a realizar un nuevo modelo constitutivo incluyendo el fallo del material descrito con la respuesta visco-elástica de un material a alta tasa de deformación, una calibración de este modelo con ensayos experimentales, la implementación en ABAQUS de la nueva teoría y la comparación de los resultados.

2.3.6. MÉTODOS EMPLEADOS EN LOS TRABAJOS REVISADOS

Vamos a encontrarnos con una gran variedad de visiones a cerca de la energía de rotura de los adhesivos, como ya se ha visto anteriormente, hay autores que obstan por la caracterización mediante la mecánica a la fractura, mientras que otros optan por el modelo de mecánica de daño. Además, nos encontramos con estudios que van a trabajar de manera distinta según se experimente con adhesivos flexibles, elásticos, plásticos, hiperelásticos o visco-elásticos, o incluso con la presencia de más de una de estas características. De esta forma, se han elegido una serie de artículos y trabajos de investigación donde se emplean todas las alternativas vistas hasta ahora, permitiéndonos conocer cuál de ellas es más interesante en cada caso. A modo de resumen podremos hablar de esta serie de enfoques, diferenciando por autores en sus diferentes trabajos. Las investigaciones se encuentran prácticamente divididas en dos grupos, los que determinan la energía por medio de los métodos de reducción de datos clásicos de la MFEL y los que han implementado la teoría de la zona cohesiva para resolver los inconvenientes.

De esta forma y de manera cronológica nos encontramos en el trabajo de (Blackman, B (1991)) hasta cuatro formas distintas de obtener del modo I de rotura con la probeta de DCB la energía de rotura G :

- Método de área: $G = \frac{\Delta U}{B\Delta a}$, siendo B la anchura del espécimen, ΔU el area bajo la curva de carga-desplazamiento y Δa el crecimiento de la grieta.
- Método de flexibilidad: $G = \frac{P^2 dC}{2Bda}$, siendo P la carga y C la flexibilidad dada de $C = \delta/P$, desplazamiento respecto a la carga.
- Método de módulo de flexibilidad: tomando la ecuación anterior y con $C = \frac{8a^3}{BEsh^3}$ tendrá $G = \frac{12P^2 a^2}{B^2 h^3 E_s}$ siendo E_s el módulo del adhesivo.

- Método de desplazamiento: $G = \frac{3P\delta}{2Ba}$

En otro trabajo posterior, (Blackman, B. R. K (2003)) se propone analizar para el modo I con las probetas tanto de DCB como de TDCB los métodos de reducción de datos clásicos de SBT, CBM y ECM, llegando a la conclusión de que únicamente los dos últimos son capaces de obtener unos resultados adecuados.

En los siguientes años, se va a ir abandonando este enfoque y obstando más por la teoría de la zona cohesiva, en parte debido a su implementación en los programas de simulación numérica, de esta forma, lo encontramos en trabajos como (Kregting, R. (2005); De Moura, M. F. S. F (2008); Niu, R.-M (2014); Chaves, F. J. P (2014)). Revisando de manera rápida los planteamientos y conclusiones que se realizan en cada uno nos encontraremos con:

En los artículos de (De Moura, M (2008); De Moura, M. F. S. F (2008); Chaves, F. J. P (2014); Sekiguchi, Y (2015)) se van a realizar una serie de comparaciones entre los métodos de reducción de datos clásicos, contando con SBT, CCM, CBT o DBT, con el propuesto por parte De Moura, el CBBM. Todos estos trabajos concluyen con el mismo resultado, para este tipo de material, el método de CBBM presenta claras ventajas a la hora de obtener el comportamiento, siendo mucho más sencillo y fiable que los demás. De manera particular, podemos destacar de forma resumida algunas de las aportaciones de los autores:

En los artículos de (De Moura, M (2008)) el autor propone una comparación entre los métodos de reducción clásicos (CCM, CBT y DBT) con la CZM, donde concluye que el método alternativo de CBBM es mucho más apropiado que los clásicos; en esta misma línea, el trabajo (De Moura, M. F. S. F (2008)) estudia tanto el modo I con la probeta de DCB como modo II con ENF, comparando los métodos de CBT, CCM y CBBM, siendo de nuevo este último el elegido; también en este sentido, (Chaves, F. J. P (2014)) vuelve a emplear tanto en el modo I como en el modo II el método de CBBM en lugar de los clásicos reducciones de datos. Por otro lado, en el caso de (De Moura, M (2008)), además de descartar los métodos de CCM, CBT y DBT tanto para modo I como modo II, se plantea emplear el modelo de CBTE propuesto por Blackamn, pero por las nuevas dificultades que conlleva, acaba empleando CBBM.

De forma alternativa, nos encontramos otros trabajos donde no se emplea la reducción de datos, sino que por el contrario será a través de la integral J de la que obtengamos el valor de G . De esta manera, vemos como en (Hasegawa, K (2015)) la energía de rotura que caracteriza a la zona cohesiva se obtiene por medio de la integral J de Riblin. De igual forma, en el caso de (Pérez-Galmés, M (2016)) se emplea la integral J para las zonas no lineales, permitiendo no medir la longitud de la grieta, en este trabajo el autor compara este método de J integral con los demás métodos vistos anteriormente, concluyendo con unas diferencias de tan solo un 2,3%.

2.3.7. IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA PARA FRACTURA

Al igual que ocurría con los modelos hiperelásticos para la densidad de energía expuestos en la caracterización mecánica, en la caracterización de la rotura de adhesivos, el papel de los programas de simulación numérica han ganado una gran importancia. De manera paralela a los ensayos experimentales y los cálculos de la energía por medio de las expresiones descritas anteriormente, los autores obtarán por complementar sus trabajos y comprobar sus teorías con ayuda de los potentes programas de cálculo de elementos finitos, de los que disponemos a día de hoy. En nuestra revisión bibliográfica hemos encontrado como algunos de los autores han hecho uso de esta herramienta, que de forma general, podemos sintetizar en los siguientes pasos:

- **IMPLEMENTACIÓN DE ECUACIÓN:**

Las ecuaciones serán introducidas al programa por medio de alguno lenguaje de programación en forma de algoritmos, como por ejemplo se explica en (Russ.J (2020)). Para esto, primero tendrá lugar un trabajo discretización y linealización de las diferentes expresiones que necesitamos incluir en nuestro programa de cálculo, como se realiza en (Kuhn, C (2010); Russ.J (2020); Loew, P. J (2019b)); seguido, generaremos un programa en lenguaje de programación con estas ecuaciones ya preparadas, para que el programa de elementos finitos pueda hacer el cálculo de las expresiones en la simulación del ensayo.

- **IMPLEMENTACIÓN DE LA PROBETA**

Para poder realizar la simulación deberemos diseñar en el programa informático la geometría representativa de nuestra probeta. Para evitar tener que diseñar la totalidad de esta, nos encontraremos únicamente en la zona que pretendamos estudiar, eliminando

todo aquello que no resulte necesario: sujeción, elementos de medición, material innecesario, etc. Una vez reducido al máximo el diseño, debemos incorporar los elementos que nos permitan ejecutar el ensayo en las condiciones idénticas a la realidad, para ello contamos con las restricciones del movimiento en el plano, permitiéndonos simular las condiciones de sujeción de la probeta; las fuerzas, para representar el movimiento que se genera en el ensayo; así como el sistema de mallado para poder obtener información de cualquier parte infinitesimal del material.

En este punto es de vital importancia seleccionar el correcto tamaño de malla, ya que será el que nos aporte una información de la deformación, en forma de cubo infinitesimal. Cuanto mayor sea la división de esta, es decir, cubos de menor lado, más preciso y real será la información que el programa nos pueda mostrar. Con el fin de no sobrecargar la simulación, se busca siempre emplear la malla más pequeña en las zonas de más interés, es decir, por donde suponemos que se debe dar el crecimiento de la grieta.

▪ DEFINICIÓN DEL MATERIAL

Sobre la base de la probeta ya definida en el apartado anterior, le introduciremos las características materiales necesarias para que sea representativo de nuestro ensayo real. Para esto tomaremos las características del material hiperelástico que hemos expuesto en la caracterización mecánica: módulo de Young, módulo de compresibilidad y módulo de corte. Además, haremos uso del correspondiente modelo hiperelástico para poder definir la curva de tensión-deformación del material.

▪ EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

Finalmente, podremos llevar a cabo la simulación al igual que en el ensayo de laboratorio con las condiciones establecidas. Los resultados obtenidos en la simulación, tanto el valor de las expresiones evaluadas en el programa, como el estado final de la probeta, serán comparados con los del modelo experimental, comprobando cuanta relación puede llegar a ver entre estos, y por tanto, cuanto de precisos han sido las simulaciones.

No obstante, en los artículos que hemos podido revisar, sus autores no se conforman con únicamente realizar la simulación y comparar ambos resultados, han ido más allá. De esta forma se busca ver cómo pueden influir los diferentes elementos de la simulación en la exactitud de los resultados. Vemos como por ejemplo en (Kuhn, C (2010)) se estudiará la influencia en la simulación del parámetro de movilidad M en la

propagación de la grieta, mientras otros como E o G_c permanecen constantes. Por otro lado, podemos encontrar en (Loew, P. J (2019b)) como se llevan a cabo unas validaciones para los parámetros materiales que se han empleado en la simulación con diferentes ensayos con las geometrías ya vistas de SENT o DENT



3. ELABORACIÓN DEL PLAN DE ENSAYO

Una vez realizada toda la investigación a lo largo de la bibliografía presentada, es necesario elaborar un plan de ensayo o actuación para poder realizar nuestra propia caracterización de los adhesivos, a partir de la información aprendida. Estos ensayos estarán orientados a obtener las características mecánicas que han sido presentadas en el anterior apartado y además, las características de rotura de las uniones con este tipo de material. Siguiendo con el esquema anterior, primero se realizarán los ensayos de caracterización mecánica y posteriormente de rotura.

3.1 PLAN DE ENSAYO PARA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA:

El objeto principal de esta parte es obtener la ley de tensión-deformación o bien de tensión-desplazamiento de cada material. A partir de esta, podremos extraer los parámetros objetivos del ensayo: módulo de Young, coeficiente de Poisson, módulo de corte y módulo de compresibilidad; así como las variables de los modelos hiperelásticos.

En este sentido, los planes de ensayos, independientemente de la característica o la probeta que estemos probando se van a desarrollar según el siguiente proceso:

- ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO.
- DISEÑO DE LOS UTILLAJES.
- EJECUCIÓN DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS.
- EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS.

3.1.1. MÓDULO DE YOUNG.

Como se ha estado recopilando de toda la bibliografía previa, los ensayos más habituales y sencillos de realizar en este sentido, constan de una probeta en forma de hueso de perro o mancuerna. Para este tipo de geometría y esta característica mecánica se emplean de forma prácticamente unánime los ensayos según las normas: ISO 37, ISO 527 y en menor medida ASTM D412. Las diferencias entre cada una de estas normas de realización de la prueba reside en la geometría de la probeta y en la condiciones de aplicación de la carga, ambas cosas deben ser diferentes debido a las distintas características de los materiales que se ensayan con cada una.

3.1.1.1. ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO:

Realizaremos las probetas en forma de hueso de perro, que se caracterizan en las distintas normas que hemos presentado. Dado la necesidad de realizar más de un ensayo para poder obtener datos relevantes en la prueba, se estima un número de probetas apropiado de mínimo 5 unidades. De manera habitual se suelen emplear entre 5 y 15 en función de la exactitud que se pretenda o se pueda obtener. Según la norma que debamos emplear tendremos:

- ISO 527:

La norma 527 es específica para los materiales plásticos rígidos, si bien no es específica para los elastómeros como los adhesivos que queremos probar, algunos autores como ocurre en (Duncan, B (2001)) si la han elegido en sus trabajos, por lo que la tendremos en cuenta. Existen dos variantes dentro de esta ISO 527-1 e ISO 527-2. En ambas la prueba es idéntica, pero debido a las diferencia entre condiciones geométricas y de velocidad de ensayo, los resultados no son iguales. Debido a la mayor utilización de la segunda, definiremos la geometría de esta.

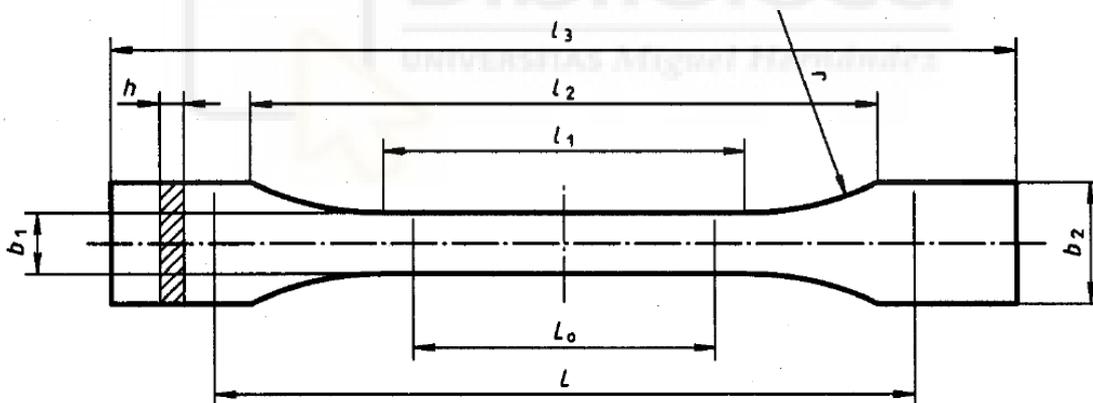


Ilustración 49: Probeta de perro ISO 527. Duncan, B (2001)

De esta geometría de tipo 2 encontramos hasta 4 medidas distintas, presentes en la siguiente tabla:

Dimensión(mm)	1A	1B	1BA	1BB
L1	80±2	80±2	30±2	12±0.5
L2	104-113	106-120	58±2	23±2
L3	≥150	≥150	≥75	≥75
r	20-25	≥60	≥30	≥12

B1	10±0.2	10±0.2	5±0.5	2±0.2
B2	20±0.2	20±0.2	10±0.5	4±0.2
h	4±0.2	4±0.2	≥2	≥2
L0	50±0.5	50±0.5	25±0.5	10±0.2
L	115±1	L2±5	L2±2	L2±1

- ISO 37:2007:

Esta norma se especifica para elastómeros, por lo que las dimensiones del hueso de perro son ligeramente distintas. Las geometrías serán como la de la siguiente imagen:

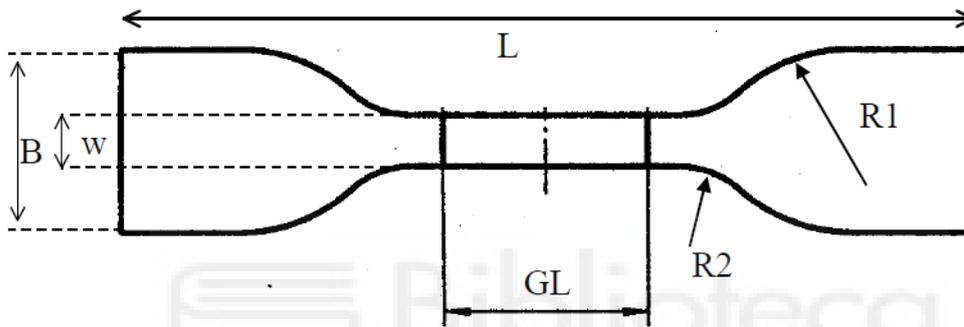


Ilustración 50: Probeta hueso de perro ISO 37:2007. Duncan, B (2001)

Los diferentes tipos de probeta estarán definidos en la siguiente tabla:

Dimensión(mm)	1	2	3	4
L	115	75	50	35
GL	33±2	25±1	16±1	12±0.5
B	25±1	12.5±1	8.5±0.5	6±0.5
W	6±0.4	4±0.1	4±0.1	2±0.1
R1	14±1	8±0.5	7.5±0.5	3±0.1
R2	25±2	12.5±1	10±0.5	3±0.1

- ASTM D412:

Esta norma se emplea para los cauchos termoestables vulcanizados y los elastómeros termoplásticos, presente en (Staudt, Y (2018)).

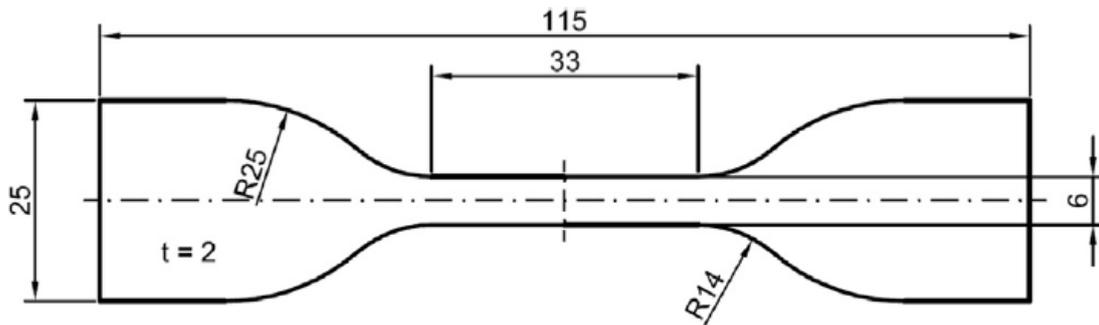


Ilustración 51: Probeta hueso de perro ASTM D412. Staudt, Y (2018)

Una vez definidas las diferentes normas que podemos tener para este ensayo, habrá que realizar la probeta con el material a ensayar. Para la preparación de estas existen diferentes métodos en la fabricación, el objetivo principal será reducir los costes empleando el mínimo material, herramientas y tiempo posible. Las probetas se podrán realizar por medio de:

- Inyección:

En el interior de un molde se introduce el material en estado líquido hasta que solidifica con la forma deseada, posteriormente se desmolda y se eliminan los retos de impurezas. El problema en este método es que la orientación de las cadenas del polímero estará caracterizada por cómo se lleve a cabo la inyección, por lo que la distribución en la pieza es menos homogénea.

- Fresado o corte:

En primer lugar se realizan por compresión láminas con el material a ensayar, posteriormente las probetas son realizadas por medio del mecanizado de esta o bien cortadas con una placa metálica con la geometría en negativo.

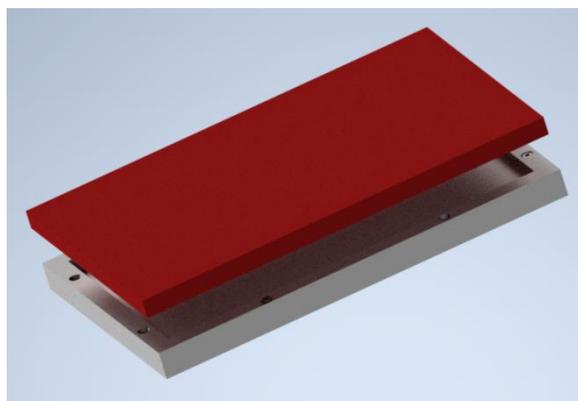


Ilustración 52: Útil preparación láminas de adhesivo.

- Vertido:

Otra manera de la fabricación será el mecanizado de una serie de moldes con una cantidad de probetas idénticas, donde posteriormente verter el material en estado líquido y esperar hasta su curado para el desmolde.

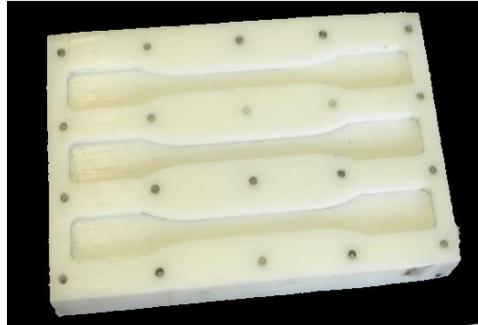


Ilustración 53: Útil preparación probetas de hueso de perro. Dias, V (2014)

3.1.1.2. DISEÑO DE LOS UTILLAJES:

Para el caso de las probetas de hueso de perro en módulo de Young, emplearemos un esfuerzo de tracción. La probeta debe ser cargada en una de sus direcciones principales, dejando libres las otras dos. Esto es posible gracias a su geometría, el pequeño espesor limita la contracción lateral durante la tracción. En el laboratorio emplearemos, al igual que en la mayoría de artículos revisados, una máquina de ensayos universal, debido a su precio reducido y versatilidad.



Ilustración 54: Diferentes máquinas de ensayo universal. Amstutz, C (2018); Staudt, Y (2018); [24]

En estas máquinas someteremos a las probetas a una tensión de tracción. Los extremos de la probeta (cabeza del hueso) estarán sujetos por medio de dos anclajes a la máquina. Uno de los extremos de la probeta estará fijo al bastidor de la máquina, mientras que el otro será sometido a una carga ascendente por medio del puente elevador. Es importante

la correcta elección del sistema de sujeción de la probeta para la correcta realización del ensayo y obtener unos datos relevantes.

La sujeción de la probeta podrá ser de dos formas diferentes: mediante las mordazas incluidas en la máquina de ensayo, sujetando la probeta por la zona más ancha (cabeza), o bien, mediante unos utillajes diseñados en el laboratorio, que también emplearemos en el resto de ensayos. Estos utillajes cuentan con una forma en U y un pasador o bulón para anclar las probetas (Plano 1), en el caso del hueso de perro, necesitaremos sujetar el material con dos pletinas metálicas en cada extremo, unidas con unión roscada y con un orificio para poder sujetarlas al utillaje de U.



Ilustración 55: Sistema de sujeción para hueso de perro.

3.1.1.3. EJECUCIÓN DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS:

Como ya hemos indicado, el ensayo se llevará a cabo por medio de la máquina universal de ensayos, generando un esfuerzo de tracción. Las condiciones para la realización de los ensayos son de vital importancia a la hora de poder comparar y evaluar el comportamiento del material, necesitaremos conocer: temperatura, humedad y velocidad de la prueba. En nuestro caso, el ensayo se desarrollará a temperatura ambiente y con la humedad del laboratorio, en cuanto a la velocidad, hemos podido ver como muchos autores suelen emplear la de 2mm/min, por lo que emplearemos esta como base de partida en nuestro ensayo.

Toma de datos:

Los parámetros que debemos medir dentro de este ensayo son la tensión y la deformación. La tensión vendrá dada por la fuerza que sea capaz de realizar la máquina de ensayos en un área, mientras que la deformación o la extensión deberán ser medidas de manera directa en la probeta.

- Instrumentación para medir la fuerza:

Para medir la carga aplicada por la máquina, en principio bastaría con tomar la carga seleccionada para la realización del ensayo, pero debido a las características de la máquina, nosotros elegiremos una velocidad de realización, donde la máquina aplica la carga. Para obtener los valores exactos, contamos con una célula de carga. Este elemento es capaz de transformar el valor de la carga en una señal de salida, su uso se

extiende bastante en el mercado por la versatilidad que ofrece. En función de qué tipo de señal ofrezca se distinguen entre: neumático, hidráulico, eléctrico. En nuestro caso contamos con un ejemplar eléctrico.



Ilustración 56: Célula de carga (compresión/tracción). [10]

- Instrumentación para medir la deformación:

Para el caso de la deformación o la extensión, contamos con diferentes alternativas. Por un lado existe la posibilidad de emplear una cámara, ya sea mediante video o fotogramas, o realizar una medición con elementos de contacto con la probeta (Ilustración 57). En el caso de contacto, se rechaza para pruebas donde se requiere de cierta exactitud, debido a las interferencias que este contacto puede causar en la deformación.

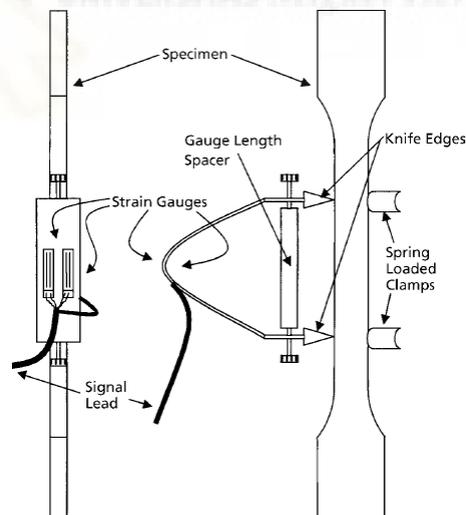


Ilustración 57: Métodos de medición. Brown, R. (2002)

Para la medida sin contacto, será necesario emplear una cámara, esta puede realizar un video continuo durante la prueba o mediante fotogramas. El segundo procedimiento ofrece unos datos puntuales de la carga-desplazamiento, por lo que serán examinados por un software de análisis de imágenes por computadora o con una retícula. Este procedimiento es más lento debido a que se debe realizar posterior al ensayo.

Por el contrario, el video permite el análisis durante el continuo del ensayo. Para ello se emplea un sistema de video extensimetría, un ejemplo bastante empleado en este campo es el digital imagen correlación (DIC). Para la correcta captación de los datos deben seguirse una serie de recomendaciones:

- Buena iluminación en el objeto: en caso de emplear focos evitar elevar la temperatura de la muestra y que se produzcan parpadeos.
- Soporte de cámara estable: montará en trípode o soporte.
- Marcas de medición de buen contraste: los puntos que toma la cámara para medir deben estar bien diferenciados en la probeta y que no se distorsione durante el ensayo.

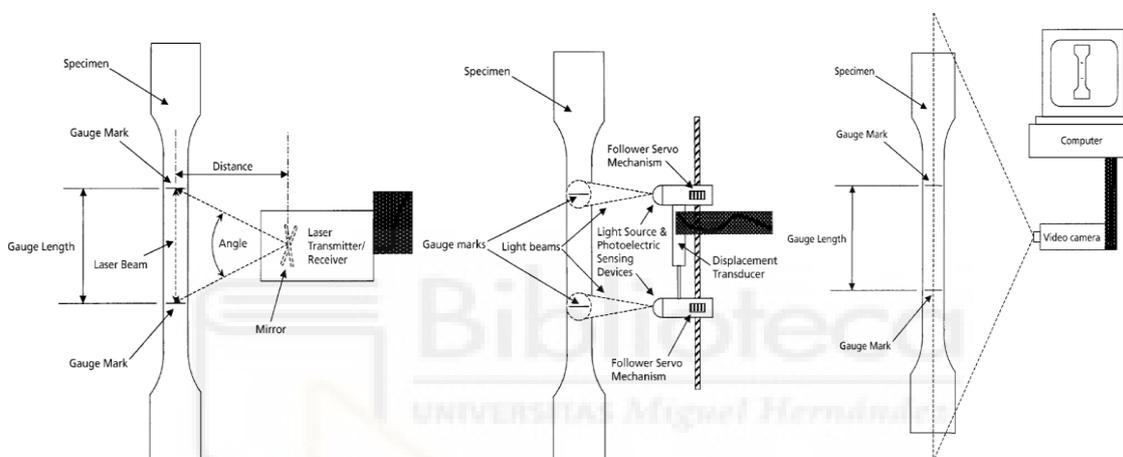


Ilustración 58: Métodos de medición. Brown, R. (2002)

Los datos que obtendremos de estos instrumentos nos permitirán realizar la representación de la tensión y la deformación. La deformación vendrá dada de manera directa por el instrumento de medida, mientras que la tensión será calculada a partir de la carga aplicada y la geometría de la probeta, recogiendo estos datos en una tabla para poder, posteriormente, enfrentarlos en la gráfica.

- La tensión: en cada ensayo se obtendrá con el valor de la carga registrado por la célula de carga, partido de la superficie de la cara del material sobre la que esta se aplica.

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

- La deformación: es captada de forma directa por el video extensiométrico.

3.1.1.4. EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS:

Como ya hemos visto antes, el módulo de Young o módulo de elasticidad en los materiales hiperelásticos es complicado de obtener. En el caso de los materiales puramente elástico, este hará referencia a la pendiente de la curva de tensión-deformación. En nuestro caso, tras la representación del comportamiento de la probeta en el ensayo de tracción, realizaremos la gráfica de tensión-deformación por medio de la computadora, obteniendo una curva del estilo:

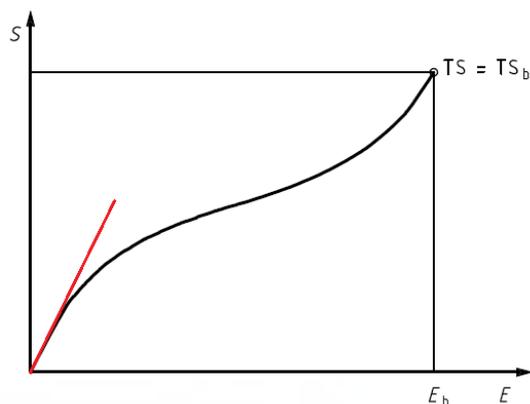


Ilustración 59: Diagrama hiperelástico. {18}

Para obtener este parámetro tomaremos la pendiente de tangente de la parte lineal. Esta zona partirá desde el 0% de elongación hasta cerca del 10%.

$$E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{S}{E}$$

3.1.2. MODULO DE CORTE.

En la parte de corte existen dos valores que son de nuestro interés, el módulo de corte G y la resistencia al corte σ . Para el módulo de corte emplearemos las pequeñas deformaciones para lograr una relación de tensión-deformación. Con respecto al valor de G existen diferentes métodos de ensayo para poder hallarlo. Hemos seleccionado algunos como los que aparecen en (Lubowiecka, I (2012); Dias, V (2014); Nunes, L. C. S. (2011)), mediante probetas de SLJ o bien con la geometría de TAST como en (Amstutz, C (2018)).

3.1.2.1. ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO:

- Probeta de SLJ (ISO4587:2003 e ISO 13445:2003)

Para realizar las probetas de este tipo es necesario contar con dos pletinas metálicas que actuarán como sustrato o adherente. Contará con las medidas según que referencias empleemos:

mm	Lubowiecka, I (2012)	Nunes, L. C. S. (2011)
L	100	50+e
l	25	25,4
s	12,5	35/42/51
h	4	1,6
e	1,6	1,6

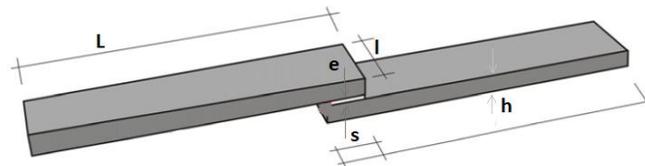


Ilustración 60: Medidas probeta SLJ. Lubowiecka, I (2012)

Estas dos pletinas se unirán por medio de un solape, que caracteriza a SLJ, mediante el adhesivo a ensayar. La longitud del solape también vendrá determinada por la norma o la experiencia, de forma general, se trata de evitar, con la correcta longitud, que tenga lugar un efecto de pelado en lugar de cortadura. En nuestro ensayo, hemos empleado unos sustratos metálicos de un espesor bastante superior a los empleados por los demás autores, para intentar reducir que se doblen durante el ensayo.

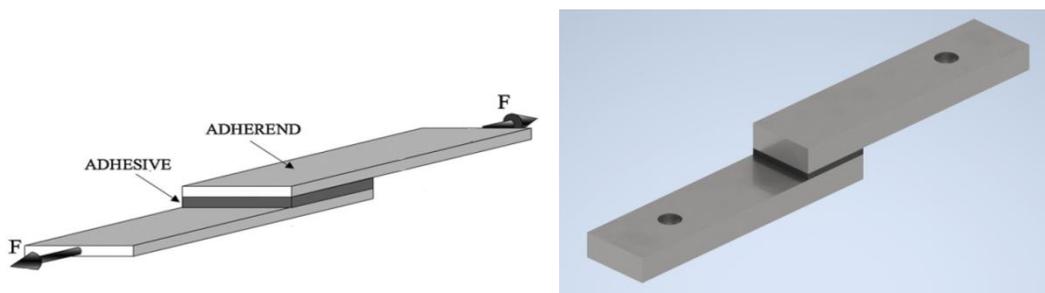


Ilustración 61: Probeta SLJ. Nunes, L. C. S. (2011)

- Probeta de TAST:

El ensayo de TAST surge para eliminar el problema de la rotación de la unión en las probetas de SLJ que acaban produciendo pelado en lugar de cizalladura. Para esto contaremos con dos láminas metálicas con un extremo en forma de L (Ilustración 62), la unión con este solape limita la posibilidad de rotación, mejorando la cortadura.



Ilustración 62: Sustrato de probeta TAST.

Las medidas serán adoptadas a partir de la experiencia apreciada en otros ensayos recogidos en la bibliografía como (Lucas da Silva, F. M (2009)).

Además de las dimensiones de los sustratos metálicos, otra de las dimensiones necesarias es el solape de la unión de ambos sustratos con el adhesivo, al igual que antes, las medidas de este estarán recogidas de los ensayos realizados por otros autores (Hasegawa, K (2003); Amstutz, C (2018)).

En nuestro caso concreto, emplearemos una geometría de SLJ, como se muestra en el plano 5, con las medidas recogidas a lo largo de la bibliografía, que serán realizadas con la ayuda de un útil fabricado en el laboratorio como:

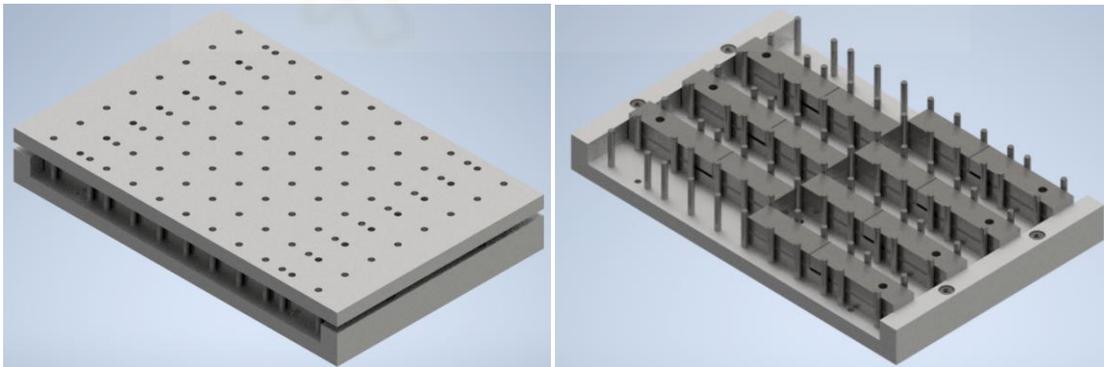


Ilustración 63: Útil para fabricación de probetas.

3.1.2.2. DISEÑO DE LOS UTILAJES

Para poder seguir empleando la máquina de ensayos universal, intentamos adaptar estas probetas a un movimiento de tracción equiparable al de los ensayos de *E*. Con unas mordazas capaces de sujetar los sustratos metálicos, tanto de TAST como de SLJ por el extremo libre de los sustratos, podremos aplicar la carga en la dirección longitudinal de la probeta, generando una cortadura.

Para este ensayo hemos diseñado un sistema de sujeción por medio de dos mordazas en forma de U y con un pasador como elemento de sujeción de la probeta. Una de ellas estará fija al bastidor de la máquina, mientras que la otra estará sujeta al brazo móvil, para generar la carga de tracción. Las dimensiones estarán expresadas en el plano 1.

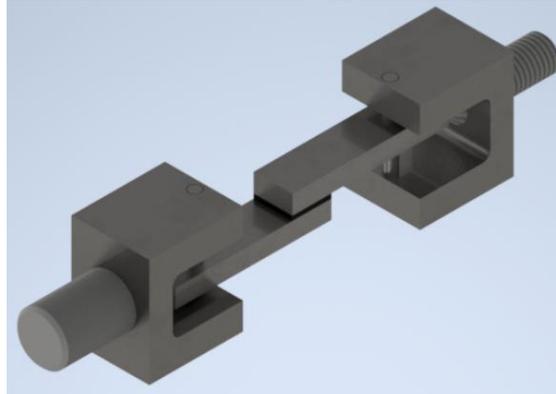


Ilustración 64: Brazos para probeta TAST y SLJ.

3.1.2.3. EJECUCIÓN DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS:

Las condiciones tanto de temperatura como de humedad seguirán siendo los estándares del laboratorio. En cuanto a la velocidad, hemos visto como los autores emplean desde los 2mm/min hasta 10mm/min, por lo que en un principio comenzaremos por estos.

Tanto para las probetas de SLJ como de TAST, la medición de la deformación en el adhesivo se volverá a emplear el sistema de video extensiométrico con un sistema de DIC. Por parte de la tensión, necesitaremos extraer la carga aplicada de la información proporcionada por la célula de carga, para por medio del área hallar la tensión. Los dos valores serán representados en la gráfica de tensión-deformación.

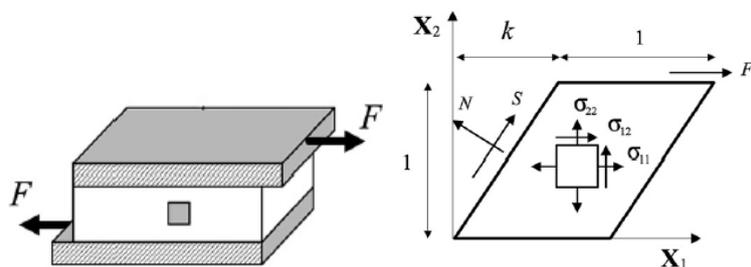


Ilustración 65: Deformación en probeta SLJ. Moreira, D. C (2013)

Tomando del documento de (Moreira, D. C (2013)) las ecuaciones para la tensión en los ejes principales en este tipo de ensayo tendremos:

$$\sigma_1 = \frac{\left[k(3 + k^2) + \sqrt{k^2(3 + k^2)^2 + 4} \right]}{2(1 + k^2)} \sigma_{12}$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \frac{[k(3 + k^2)]}{(1 + k^2)} \sigma_{12}$$

$$\sigma_3 = \frac{[k(3 + k^2) - \sqrt{k^2(3 + k^2)^2 + 4}]}{2(1 + k^2)} \sigma_{12}$$

$$\sigma_{12} = \frac{F}{S}$$

3.1.2.4. EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS

El módulo de corte vendrá dado por la expresión:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

La variable de el esfuerzo cortante τ vendrá dado por la carga aplicada sobre la probeta de forma $\tau = \frac{F}{lxw}$ (lxw valores geométricos), mientras que la deformación medida con la computación, es debida al cortante que actúa sobre la superficie, de la forma $\gamma = \frac{\Delta x}{l}$.

3.1.3. COEFICIENTE DE POISSON.

Aunque la determinación del coeficiente de Poisson es delicada para los materiales hiperelásticos, de manera general se suele tomar como un material incompresible, por lo que el coeficiente $\nu = 0.5$. No obstante, debido a que este valor es aproximado, si queremos comprobar que se cumple esto, existen diferentes ensayos, como se han visto en la bibliografía. Destacaremos en especial: ensayo con norma ISO 37 en (Cabello, M (2016)), ensayo de compresión en (Amstutz, C (2018)) o mediante ultrasonido en (Staudt, Y (2018)). Además de esto, en otros artículos se ha decidido por suponer de manera inicial la incompresibilidad y una vez definido el modelo de comportamiento del material, obtener de manera inversa el coeficiente mediante pequeñas variaciones de este en modo de prueba, o bien mediante la ecuación que relaciona el módulo de corte y el coeficiente de Poisson. En este apartado nos centraremos en exponer los ensayos con las probetas de hueso de perro o las de compresión, con el fin de poder simplificar y reducir tanto los utillajes como la preparación. Sin embargo, la forma que emplearemos de manera habitual será el cálculo inverso a partir del módulo de corte.

3.1.3.1. ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO.

El proceso será idéntico los apartados de las respectivas probetas:

- Hueso de perro

Con las mismas probetas y misma norma que en los ensayos de módulo de Young podemos evaluar el coeficiente de Poisson de nuestro adhesivo. El proceso para la realización es idéntico al anterior, con los datos obtenidos en la zona línea de tensión-deformación recurriremos directamente a calcular el valor de ν . Como se exponía en la primera parte, este coeficiente evalúa la variación de deformación en la dirección de la carga con respecto a las demás, necesitaremos por tanto medir la deformación también la alguna de las direcciones donde no tiene lugar la carga de tracción (en el ensayo de E). Como disponemos del video extensómetro se hallará de igual manera que en la dirección x .

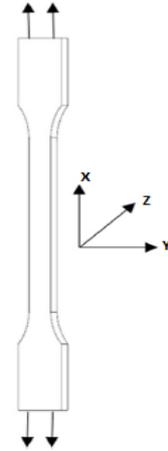


Ilustración 66: Probeta hueso de perro para Poisson. Amstutz, C (2018)

- Barril o Cilindro

Con la misma geometría que en los ensayos del módulo de compresibilidad podremos determinar este coeficiente. Como ya se ha mencionado antes, ambos parámetros están relacionados. Por lo que algunos autores emplean esta probeta de cilindro para ambas caracterizaciones. Las probetas se construirán según la norma ASTM 395, las dimensiones en este caso estarán dadas en el apartado para la caracterización del módulo de compresibilidad. (Ilustración 68)

3.1.3.2. PREPARACIÓN DE LOS UTILLAJES.

En este caso, dado el uso de probetas ya definidas para otros ensayos, podremos emplear también los mismos utillajes.

3.1.3.3. EJECUCIÓN DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS:

El ensayo se realizará nuevamente en las condiciones de temperatura ambiente, con humedad normal del laboratorio y una velocidad estándar de 2mm/min.

En el caso de Poisson también debemos medir la deformación y la carga, al igual que en Young. Sin embargo esta vez será necesario no solo conocer la deformación en la dirección principal, sino que también en otra perpendicular, para poder evaluar como

esta cambia. En el caso del video extensionométrico permite este tipo de medición en dos ejes, por lo que sigue siendo válido.

3.1.3.4. EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS.

El coeficiente de Poisson será extraído a partir de la gráfica que representa la carga frente a la deformación de la probeta. Al igual que para Young, tomaremos la parte de la curva donde el comportamiento aun es lineal, pero necesitaremos dos representaciones, una por cada eje de la probeta que estemos midiendo la deformación. Mediante la expresión:

$$\nu = \left| \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \right|$$

Otra manera de poder evaluar este coeficiente a partir de la deformación se expresa con la función extraída de (Duncan, B (2003)):

$$\nu = \frac{1}{(1 + \epsilon_x) + \sqrt{1 + \epsilon_x}}$$

Si representamos la variación del coeficiente junto a la curva de esfuerzo-deformación, obtendremos una gráfica del tipo:

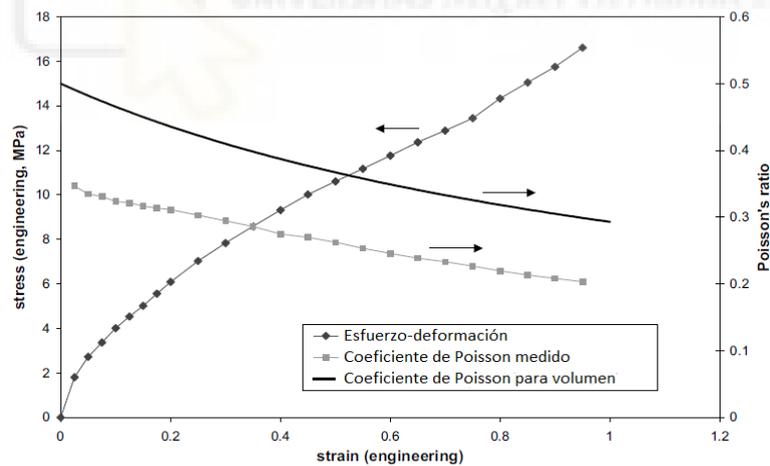


Ilustración 67: Diagrama de deformación con coeficiente de Poisson. Duncan, B (2003)

En esta gráfica vemos como el adhesivo hiperelástico es compresible, teniendo un coeficiente de Poisson entorno a 0’3 para el inicio de la deformación, variando hasta 0’2. Para poder considerarse como incompresible la gráfica debería ser igual a la de variación de ν con volumen constante.

En el caso concreto de nuestro ensayo en el laboratorio, vamos a omitir este tipo, calculando el coeficiente de una forma indirecta a partir del módulo de corte G . Como

hemos estado exponiendo a lo largo del trabajo, todos estos parámetros característicos están ligados, de manera que podemos evitar la complicación que supone hallar el coeficiente de Poisson para un material hiperelástico y ahorramos en tiempo y costes. La expresión que vamos a emplear para ello será:

$$2G(1 + \nu) = E = 3K(1 - 2\nu)$$

Con esta expresión quedará ligado el módulo de Young E , el módulo de compresibilidad K , el de corte G y el coeficiente de Poisson ν .

3.1.4. MÓDULO DE COMPRESIBILIDAD.

Al igual que con el caso del coeficiente de Poisson, esta propiedad podrá ser determinada de manera directa con un ensayo o por medio de las demás propiedades. Centrándonos en los ensayos, hemos visto en la bibliografía repasada que es habitual el uso de probetas en forma cilíndrica, sometidas a una carga de compresión para evaluar este parámetro. Vamos a desarrollar el plan de ensayo para la prueba de confinamiento, tal y como se presenta en (Amstutz, C (2018); Peng, S. H (1994)), o libre:

3.1.4.1. ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO:

Para esta prueba se realizan probetas con el adhesivo de forma cilíndrica según la norma ASTM D395. Esta norma establece hasta dos tipos de probeta, con las siguientes dimensiones:

Tipo	Diámetro (mm)	Altura (mm)
Tipo 1	29±0.5	13±0.2
Tipo 2	12.5±0.5	6±0.2

La diferencia entre los dos tipos reside en que el primer se realiza a fuerza constante mediante un resorte, mientras que el Tipo 2 se da a deformación constante con tornillos de apriete.

Las probetas con el material adhesivo se podrán elaborar de distinta forma. Lo más habitual es emplear un molde con alguna de las dos geometrías expuestas y elaborarlas mediante vertido del material en cavidades y dejarlo curar hasta estar listo.



Ilustración 68: Diagrama de deformación con coeficiente de Poisson. Chiminelli, A (2019); Amstutz, C (2018)

Asumimos que el material es de densidad constante, por lo que el cambio en volumen será equiparable a la reducción de peso.

3.1.4.2. DISEÑO DE LOS UTILLAJES.

En cuanto a los utillajes para la realización de este ensayo tendremos dos alternativas, para el caso de la compresión con la probeta confinada o con esta libre.

- Utillaje para confinamiento:

En este caso es necesario preparar un sistema de cilindro y pistón donde introducir la probeta de material en masa. El cilindro debe tener el tamaño necesario para introducir el cilindro de material adhesivo. Posteriormente, un pistón actuará sobre esta probeta provocando una carga constante en su superficie expuesta.



Ilustración 69: Útiles para ensayo de compresión confinada. Peng, S. H (1994); Amstutz, C (2018)

La base del cilindro se anclará al chasis de la máquina de ensayos por medio de mordazas, mientras que por medio de una prolongación del pistón la parte móvil de la maquinaria realizará la fuerza de compresión.

- Utillaje para compresión libre:

En el caso de realizar la prueba sin confinar, bastará con emplear dos placas planas para situar en ambas bases del cilindro. Estas placas están adaptadas a la máquina universal de ensayos.

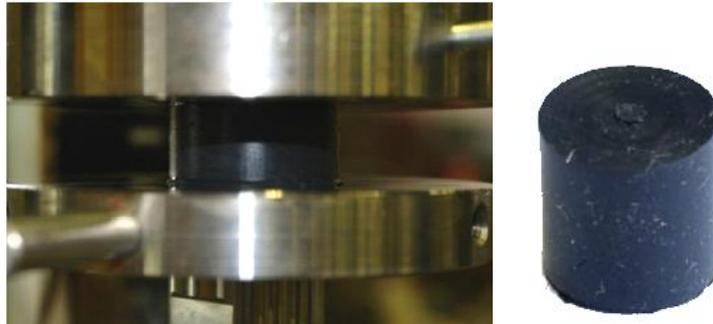


Ilustración 70: Útiles para compresión. Staudt, Y (2018)

Una de las placas estará apoyada en el bastidor de la máquina, mientras que la otra será accionada por la parte móvil de la máquina efectuando la compresión.

3.1.4.3. EJECUCIÓN DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS:

Las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo la prueba vendrán descritas por la norma. En algunos casos no encontramos una norma concreta que se ajuste a nuestro ensayo, de forma que se intentará simular unas condiciones reales de uso del material. Para ambos tipos de prueba, confinada o libre, uno de los condicionantes para la prueba es reducir el rozamiento entre las caras del material y los utillajes. Para esto aplicaremos lubricante de silicona para evitar que se produzcan errores en la recogida de datos.

Para determinar la constante de compresibilidad es necesario tener información tanto de la carga como de la deformación. Necesitaremos por tanto dos instrumentos como mínimo:

- En el caso de emplear el sistema de cilindro pistón:

La deformación vendrá dada por la presión del pistón sobre la cara libre del adhesivo. Por medio de un video extensómetro mediremos el desplazamiento de este pistón, marcado con un punto de referencia para la telemetría. En el resto de direcciones la deformación estará impedida por el utillaje. Por otro lado, la carga se obtendrá mediante la célula de carga de compresión.

- En el caso de una compresión libre:

Será empleado un sistema de DIC para observar la deformación a medida que es aplicada la carga. Esta instrumentación debe seguir los mismos principios que en el resto de ensayos ya descritos. Por otro lado, la carga se obtendrá mediante la célula de carga de compresión

3.1.4.4. EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS

El módulo de compresibilidad o K vendrá dado por la pendiente de la curva que representa la relación carga-deformación. Tomaremos como incompresible aquellos materiales que tengan un valor de K pequeño, pudiendo aproximar el coeficiente de Poisson a 0.5.

Los cálculos que se emplean para hallar este valor son:

$$K(\epsilon_v) = \frac{dp}{d\epsilon_v}$$

$$p = F/A_p$$

$$\epsilon_v = \frac{v_0 - v}{v_0} = \frac{h_0 - h}{h_0}$$

Si queremos obtener un valor más exacto, debido a que se trata de un comportamiento no lineal, debemos emplear una formulación de la forma incremental:

$$K^{i\text{inc}}(\epsilon_v) = \frac{\Delta p}{\Delta \epsilon_v} = \frac{p^{i+1} - p^i}{\epsilon_v^{i+1} - \epsilon_v^i}$$

3.1.5. PARÁMETROS DE MODELOS HIPERELÁSTICOS

Además del comportamiento del material que se ha descrito en los anteriores ensayos, para determinar el modelo hiperelástico que mejor se adopte a cada tipo de material es necesario realizar otros ensayos adicionales. El objetivo en esta parte es determinar la densidad de energía de deformación W , mediante alguno de los modelos desarrollados por los autores vistos en la bibliografía a lo largo de la historia del estudio de este tipo de materiales. Como se ha visto en apartados anteriores, los modelos que más se emplean en la literatura de materiales hiperelásticos se pueden resumir en 4: Mooney-Rivlin model, Neo-Hookean model, Ogden model y Yeoh model. El procedimiento para determinar el modelo más apropiado para el material y determinar así la W será el siguiente:

- Ensayo de laboratorio en diferentes condiciones de carga.
- Representación de los datos obtenidos en la gráfica tensión-deformación.
- Ajuste de los modelos mediante ordenador a partir del ensayo experimental.
- Representación de la simulación en una gráfica de tensión-deformación.
- Simulación del ensayo experimental con las características extraídas.
- Cálculo de la densidad de energía W

3.1.5.1. ENSAYOS EXPERIMENTALES:

Como hemos visto en la bibliografía los ensayos que realizan los autores son muy diversos, en algunos casos se decide por únicamente realizar uno u otras veces se llegan a emplear todos los posibles. En nuestro caso, y para poder saber que no estamos cometiendo un error por escatimar en ensayos, vamos a realizar los siguientes: tensión uniaxial, tensión mutiaxial (equi-biaxial) y tensión plana. De esta forma, obtendremos el comportamiento del material bajo distintas condiciones, más próximos a las que pueden tener en un uso de aplicación real. Para la ejecución de cada una de estas pruebas desarrollaremos un plan de ensayo similar a los ya expuesto anteriormente.

- **TENSIÓN UNIAXIAL:**

Para este caso tenemos ya tres alternativas expuestas en los aparatos anteriores: la prueba de tracción con hueso de perro, la compresión de cilindros de material en masa o bien con la cizalladura simple en la probeta SLJ. Además, también debemos tener en cuenta las probetas de tensión plana (planar tensión):

Para los ensayos de tensión plana se busca que de los tres ejes principales de la probeta, únicamente uno de ellos este sometido a una tensión ($\sigma_1 = 0 ; \sigma_2 = \sigma ; \sigma_3 = 0$). Para esto, se busca que la probeta, pese a ser un elemento en 3 dimensiones, una de ellas pueda ser tomada como nula mediante la correcta geometría. De esta manera, se consigue producir una cortadura pura en el centro de la probeta.

I. Elaboración de la probeta de ensayo

Las probetas para este tipo de ensayos estarán diseñadas como láminas de material adhesivo. Tenemos que buscar unas proporciones en las medidas, de manera que se garantice una tensión plana en el material, buscamos provocar una cortadura pura en el centro de la probeta. Para ello, autores como (Amstutz, C (2018)) recomiendan una probeta con la dirección X al menos 10 veces mayor que Y:

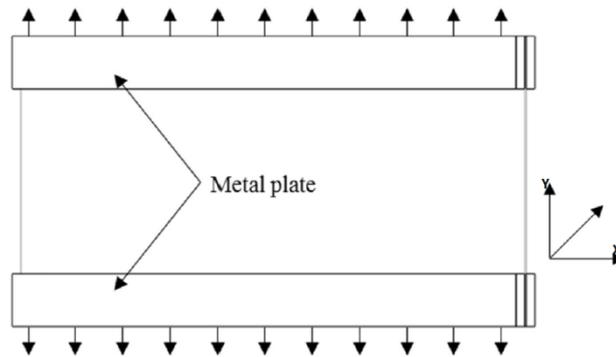


Ilustración 71: Probeta para tensión plana. Amstutz, C (2018)

En artículos como (Duncan, B (2003)) se emplean láminas de 200x60 mm, mientras que en (Moreira, D. C (2013)) se emplea unas dimensiones de 150x70x3, 4 mm o (Amstutz, C (2018)) con unas dimensiones de 200x110x2 mm. Todas serán válidas para las pruebas que pretendemos realizar en el laboratorio. A la hora de elaborar estas probetas, habrá dos posibilidades:

- Preparar una lámina extensa del adhesivo que posteriormente cortaremos con las respectivas medidas, teniendo en cuenta a demás que parte de la lámina deberá ser empleada para poder sujetarse en el utillaje.

- Otra alternativa para facilitar el agarre será incorporar a cada probeta un sistema de sujeción: emplearemos dos perfiles metálicos en forma de L por cada extremo de la lámina. Estos perfiles se unirán mediante el proceso de pegado. Colocaremos en una placa de montaje los dos primeros perfiles de una de las caras, aplicaremos el adhesivo líquido y posteriormente introduciremos las otras dos formas de la sujeción superiores. Tras montar la probeta se dejará que cure. Con este método la sujeción del adhesivo se vuelve mucho mejor, sin embargo, el trabajo y material necesario para hacer todas las probetas es mucho mayor.

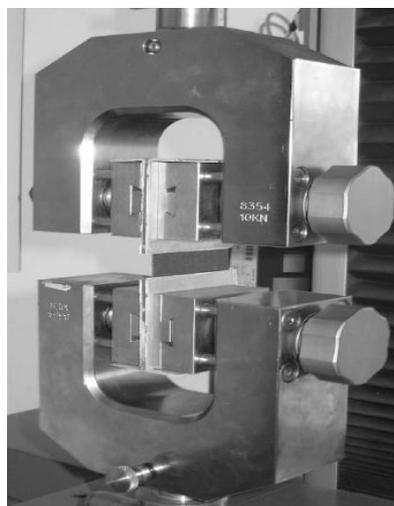


Ilustración 72: Útil para tensión plana. Sasso, M (2008)

En el laboratorio contaremos con el molde del plano 4, para la elaboración de estas láminas del material adhesivo:

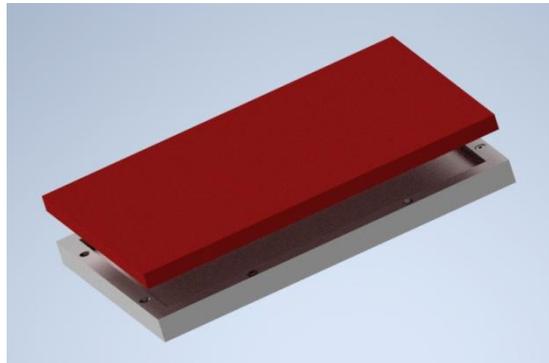


Ilustración 51

II. Diseño de los utillajes.

Los utillajes serán los mismos tanto para las probetas con perfiles metálicos como las que sujetemos de manera directa. Como la prueba va a ser efectuada de nuevo en una máquina de tracción universal, debemos plantear como poder sujetar la probeta para efectuar este esfuerzo plano:



Ilustración 73: Útiles para tensión plana. Duncan, B (2003); Kim, B (2012); Moreira, D. C (2013)

Existen tanto autores que obstan por emplear dos pletinas para sujetar cada cara en su extremo y unir las por medio de tornillos que pasan a través de la probeta o bien por emplear únicamente uniones en los extremos, sin llegar a tocar el material de prueba. Únicamente nos interesará hacer uso de las uniones a lo largo de toda la probeta siempre

que empleemos los perfiles metálicos de sujeción en el adhesivo, ya que de no ser así, puede llegar a fallarnos antes de completar la prueba correspondiente. Para el laboratorio realizaremos, para sujetar cada extremo, dos pletinas metálicas unidas mediante uniones roscadas, evitando agujerear el adhesivo, y con el correspondiente orificio para poder sujetarla con la mordaza diseñada en forma de U (Plano 1):

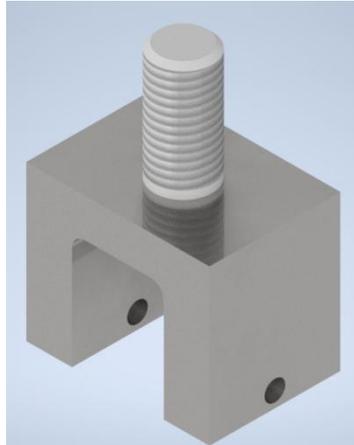


Ilustración 74: Útil de diseño propio para tensión plana.

III. Ejecución del ensayo y toma de datos:

Manteniendo la temperatura y la humedad del resto de experimentos, la velocidad de ejecución de este ensayo, tomada de algunos de los artículos revisados estará entorno a 1mm/min.

Al igual que pasaba con los ensayos anteriores, la medición de la deformación vuelve a efectuarse con el método de DIC. Para poder obtener una buena correlación entre el estado deformado y el intacto, las muestras serán pintadas de un color oscuro (negro) mediante espray, para obtener zonas de dos colores distintos.

La fuerza que se aplica en el ensayo, al igual que el resto de pruebas en esta máquina, podrá ser determinada por medio de la célula de carga. Posteriormente, deberemos calcular la tensión en el material, para ello emplearemos esta carga que tenemos registrada y el cambio de área de la probeta (superficie de actuación de la carga):

$$\sigma = \frac{F}{L}$$

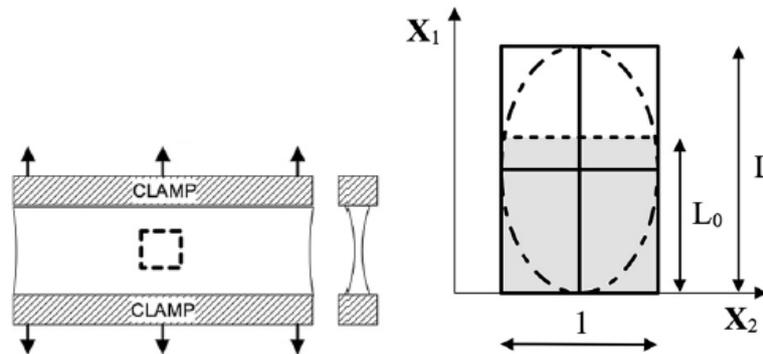


Ilustración 75: Representación de deformación tensión plana. Moreira, D. C (2013)

IV. Representación del ensayo

Partiendo de los datos obtenidos de manera experimental, elaboraremos la gráfica de tensión-deformación, será necesaria la representación de esta en el ordenador para la posterior comparación con las simulaciones

Para facilitar los ensayos con tensión uniaxial, vamos a optar por emplear únicamente la probeta de hueso de perro, realizando el procedimiento idéntico al de la caracterización del módulo de Young, y el ensayo de tensión planar explicado en este apartado. Ambos serán repetidos mas tarde en otra caracterización.

- **TENSIÓN EQUI-BIAXIAL:**

Como se exponía anteriormente, el objeto de este ensayo es realizar sobre una probeta de material una tensión igual en dos de sus direcciones principales:

I. Elaboración de la probeta de ensayo:

En el caso de la prueba equi-biaxial no existe una normativa referida a los materiales hiperelásticos. Sin embargo, los autores de distintos artículos que han estudiado su comportamiento han decidido por emplear, en su mayoría, la probeta en forma de cruz:

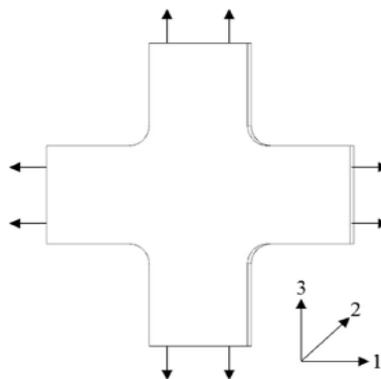


Ilustración 76: Probeta de cruz tensión bi-axial. Amstutz, C (2018)

Como ya se había dicho anteriormente, presenta la ventaja de poder, mediante el correspondiente utillaje, ser ensayada en una máquina universal de tracción, además esta geometría permite obtener de manera simultánea tanto el comportamiento uniaxial como biaxial. Las dimensiones de estas probetas las obtendremos de la siguiente tabla, su método de realización será igual al del resto de probetas de material en masa, por medio de molde o corte.

Dada la escasa investigación que se ha encontrado en torno a estas probetas en forma de cruz, es difícil poder determinar una norma para su elaboración. En los documentos revisados, encontramos algunas dimensiones como:

Dimensiones (mm)	Crocker, L. E (1999)	Duncan, B (2001)
L	28	45
e	2	2

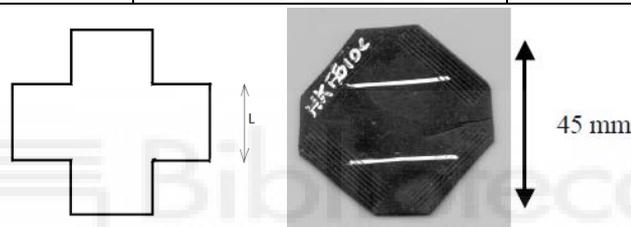


Ilustración 77: Probeta para tracción bi-axial. Duncan, B (2001)

II. Diseño de los utillajes:

Los utillajes para esta probeta buscan poder adaptarse a la máquina universal de ensayos, que ya disponemos en el laboratorio, de forma que pueda realizarse de manera idéntica a un ensayo de tracción. Para esto se diseña una herramienta o utillaje con sistema de tijera.

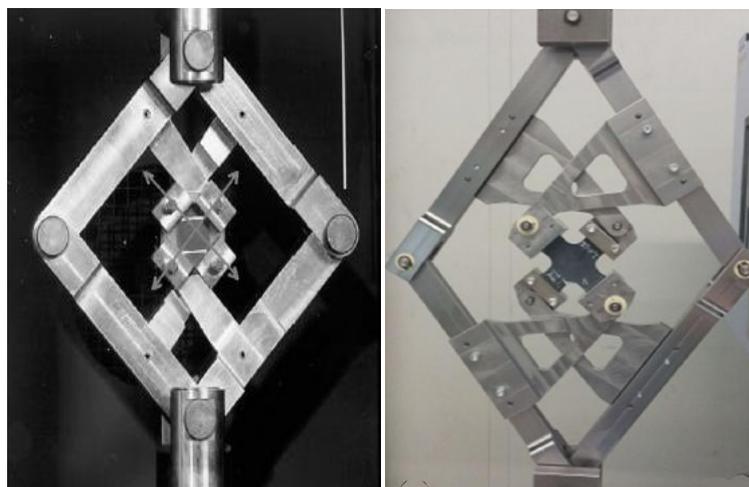


Ilustración 78: Utillaje para tracción bi-axial. Duncan, B (2003); Amstutz, C (2018)

III. Ejecución del ensayo y toma de datos:

Para esta prueba volvemos a necesitar la deformación y la tensión sobre la probeta. La parte de la deformación se podrá obtener de nuevo mediante un sistema de imágenes, como el video extensiométrico, necesitando de dos ejes de medición, uno por cada par de brazos de la cruz.

Para el caso de la tensión, será a través de la carga, pero tampoco podrá ser obtenido directamente, como si en la prueba uniaxial. La fuerza es aplicada en cada uno de los puntos de unión con la máquina, descomponiéndose posteriormente en cada una de los brazos de la probeta, lo que genera que la tensión se reparta de forma bastante heterogénea por la probeta.

La carga vendrá dada por la máquina de tracción a la que acoplamos el utillaje, siendo medida por medio del sistema de la célula de carga.

Las condiciones bajo las que se realiza el ensayo serán de temperatura y humedad normales, con una velocidad, escogida de (Crocker, L. E (1999)) de 2mm/min

IV. Representación del ensayo.

A partir de la información obtenida de los diferentes elementos de medición realizaremos la gráfica de tensión-deformación que caracteriza a este experimento, para poder más tarde compararla con las simulaciones en computador.

3.1.5.2. AJUSTE DE LOS MODELOS:

Una vez ejecutados los ensayos experimentales, debemos establecer los modelos hiperelásticos que mejor se ajustan a nuestro adhesivo. Para ello, todos los datos que hemos obtenido de los tres tipos de ensayos anteriores serán recogidos en un programa de ordenador, ABAQUS en nuestro caso, en forma de fichero de datos. Estos datos de la tensión y la deformación recogida en cada probeta se emplearán para realizar la gráfica representativa de cada ensayo, donde el eje de abscisas recoge la deformación, mientras que el de ordenadas la tensión.

Los programas de simulación, como ABAQUS, permiten representar el comportamiento del material a partir de los datos que ya tenemos recogidos, por medio de la gráfica de tensión-deformación, correspondientes a cada uno de los modelos hiperelásticos que queremos usar (N-H, M-R, Ogden o Yeoh). Estos modelos tienen una ecuación constitutiva que representa el comportamiento de los materiales, en estas ecuaciones nos encontramos una serie de parámetros que o bien podemos introducir manualmente o

bien, dejar que con el cálculo inverso, el programa nos los muestre. En esta parte del procedimiento emplearemos el cálculo inverso, le diremos al programa los modelos que queremos que nos represente con los datos que le hemos introducido los de las pruebas experimentales. El programa nos mostrará las gráficas de cada modelo junto a la de los datos experimentales, como gráficas de tensión-deformación:

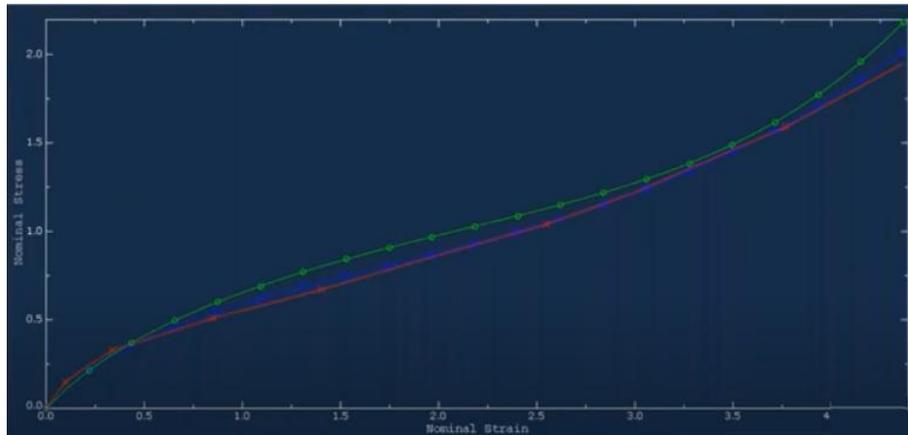


Ilustración 79: Gráfica simulación de ensayos de tensión-deformación. { 15 }

En esta gráfica tendremos la representación de Ogden, Yeoh y M-R junto a los datos de los experimentos de los tres ensayos (uniaxial, biaxial y plano). A partir de estas representaciones, podremos ver cuál de los modelos es más acertado para cada comportamiento del material. Además de estos datos simples, también hemos visto como algunos autores representaban en una misma curva los valores de combinar varias de las pruebas experimentales, si bien es cierto que no suele encontrarse una correlación con los modelos hiperelásticos tan fácilmente, las tendremos también en cuenta.

Junto a las gráficas de tensión y deformación, tendremos una tabla donde se muestran los parámetros de cada modelo calculados a partir de los datos experimentales:

Mooney-Rivlin		Ogden (N=2)		Ogden (N=3)	
C_{10}	0.564541596	σ_1	1.91012632	σ_1	0.684954118
C_{01}	0.045133044	μ_1	1.22329296	μ_1	3.56339396
		σ_2	-10.1522694	σ_2	12.3419129
		μ_2	0.000206027	μ_2	0.001018595
				σ_3	0.402641337
					-2.29692662

Material Model	C_{10} [MPa]	C_{01} [MPa]	C_{11} [MPa]	C_{20} [MPa]	C_{30} [MPa]
Mooney-Rivlin 2	0.59	0.56			
Mooney-Rivlin 5	0.17	1.58	- 1.61	- 0.28	1.71
Neo-Hooke	1.22				
Yeoh	1.67			- 1.79	1.61

Ilustración 80: Gráfica simulación de ensayos de tensión-deformación. Amstutz, C (2018)

Partiendo de estos parámetros calculados para cada modelo, podremos hallar la densidad de energía W según la expresión de cada autor, como ya hemos visto en apartados anteriores, estas se expresan como:

-Mooney-Rivlin: $W = \sum_{i,j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i}$

-Neo-Hookean: $W = \frac{1}{2} NKT(I_1 - 3) + \frac{1}{D_1} (J_{el} - 1)^2$

-Yeoh: $W = \sum_{i=1,j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i}$

-Ogden: $W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i}$

3.1.5.3. ENSAYOS MEDIANTE SIMULACIÓN

Con el ajuste de los modelos del apartado anterior obtendremos los parámetros que necesitamos para las ecuaciones constitutivas del material. De esta forma y junto a los parámetros ya obtenidos en la caracterización mecánica, definiremos el material adhesivo. Con esta información podremos realizar una simulación en el programa de nuestros ensayos. El proceso para la simulación de los ensayos será el siguiente:

I. Diseño de la probeta:

La probeta será diseñada en el programa de elementos finitos. Los diferentes materiales que componen la probeta deben ser introducidos en programa y agregar las características mecánicas de cada uno, de manera que el ensayo sea lo más fiel posible a la realidad. El material adhesivo vendrá caracterizado por los parámetros obtenidos de los ensayos previos, mientras que los adherentes por las propiedades que conocemos de este tipo de material. Una vez definido esto, se establece, una división de la probeta en pequeños cuadrados o elementos, que recibe el nombre de malla. El tamaño de esta malla determinará la exactitud de los datos que nos ofrezca la simulación, cuando menor sea esta, sobre todo en las zonas que más nos interese su evaluación, más se deberán asemejar a la realidad.

II. Condiciones contorno:

Para no tener que representar todo el sistema del ensayo (máquina, utillajes, probeta, etc.) únicamente se realiza la probeta, a la que se le somete a una serie de restricciones, que representarán el método de sujeción en la prueba real, las cargas y los desplazamientos posibles. Además de las restricciones, se establece las condiciones en las que se va a aplicar la carga para provocar la debida deformación. El objetivo es representar lo mejor posible el ensayo real

III. Representación del ensayo:

Una vez realizado todo lo anterior, se simula la prueba. Los resultados que serán dados por el programa serán la tensión y la deformación de la prueba. Estos datos los vamos a exportar a una gráfica donde se enfrenten, para poder compararla con los resultados experimentales.

3.2 PLAN DE ENSAYO PARA CARACTERIZACIÓN DE ROTURA:

En la parte de los ensayos de rotura, el procedimiento será algo similar al caso anterior, sin embargo, también haremos uso tanto de los ensayos experimentales como de las simulaciones por ordenador. El objetivo de estas pruebas será la obtención de la energía de rotura de cada tipo de adhesivo que ensayemos, además, como hemos visto anteriormente, la rotura puede darse de manera distinta y por tanto, también corresponderle valores diferentes respectivamente. En nuestra ocasión, vamos a realizar ensayos de rotura para: modo I, modo II.

3.2.1. ENSAYO MODO I:

En este ensayo de modo I la probeta será sometida a una tracción normal al adhesivo, que genera una separación normal de los sustratos o pelado:

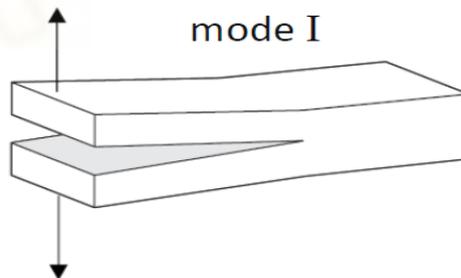


Ilustración 81: Representación apertura modo I. Chaves, F. J. P (2012)

Seguiremos el procedimiento ya establecido para el resto de ensayos en esta parte experimental:

3.2.1.1. ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO

Los autores de los diferentes artículos analizados coinciden casi siempre en emplear las probetas de DCB para analizar la rotura de modo I. Como se ha expuesto anteriormente, existen otras alternativas, sin embargo, la elección de DCB se debe a la facilidad de preparar y ejecutar la prueba posteriormente. Estas probetas están reguladas

por normas para su estandarización, una de las más empleadas y por tanto, la elegida en nuestro caso es ASTM D3433.

La probeta de modo I para DCB contaría con dos pletinas metálicas actuando como sustrato y unidas por una capa de adhesivo, dejando libre una zona, para provocar el inicio de la rotura. En la zona sin adhesivo, los sustratos contarán con dos orificios donde se efectuará el inicio de la separación por medio de la máquina de ensayo.



Ilustración 82: Probetas para modo I.

Estas probetas se llevarán a cabo con ayuda de los utillajes ya empleados para las de TAST o SLJ (Ilustración 83). Se colocará la primera pletina metálica sobre la base del utillaje, añadiremos la capa de adhesivo en esta, junto con un separador para generar el hueco. Posteriormente colocamos la segunda pletina y la parte superior del utillaje para que ejerza la presión durante el curado.

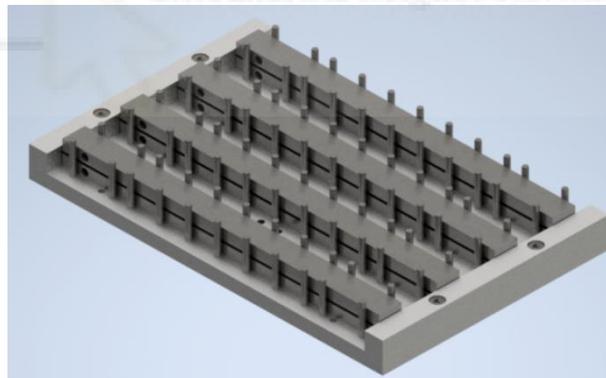


Ilustración 83: Útil para probetas de modo I.

Las dimensiones empleadas en estas probetas están recogidas en la siguiente tabla:

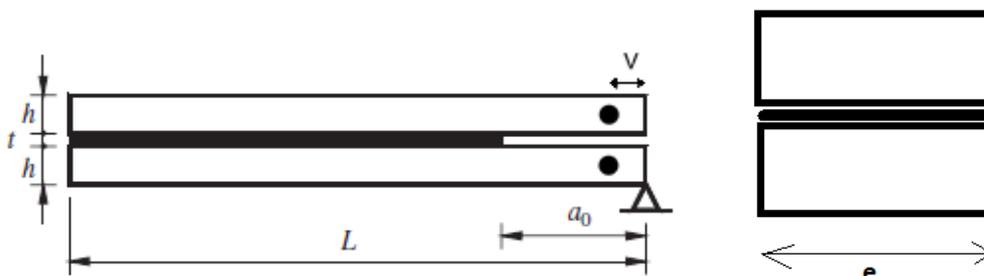


Ilustración 84: Representación probetas de modo I. De Moura, M. F. S. F (2008)

Dimensiones (mm)	Blackman, B. R. K(2003)	Hasegawa, K (2015)
L	290	300
a0	40	50
h	12,7	12 o 6
e	25	25
r	6	-
v	12,7	-
t	1	3

3.2.1.2. DISEÑO DE LOS UTILLAJES.

Para la ejecución del ensayo de modo I de rotura, podremos emplear sobre la máquina universal de ensayo el mismo utillaje ya diseñado para las probetas tanto de SLJ como TAST. Estas mordazas se instalarán sobre la máquina, de manera que se genere un esfuerzo de tracción sobre cada una de las caras de las pletinas metálicas de la probeta, una de ellas quedará fija en el bastidor de la máquina, mientras que la otra sujeta al brazo móvil.



Ilustración 85: Sujeción de probetas de modo I.

Mediante la máquina de tracción, se genera una tracción en el extremo de los orificios de sujeción, provocando el fallo de pelado, la tracción normal al plano del adhesivo y una separación normal en la interfase.

3.2.1.3. EJECUCIÓN DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS.

De nuevo, las condiciones bajo las cuales se efectúan este tipo de ensayos serán la temperatura ambiente y la humedad del laboratorio. En cuanto a la velocidad del ensayo, algunos autores como (Zhou, Q.-C (2013); Pérez-Galmés, M) emplean un rango de 1mm/min, por lo que lo tomaremos como punto de partido, aunque también es habitual encontrar una velocidad de 2mm/min.

En el ensayo necesitamos medir los siguientes parámetros: longitud de la grieta durante su propagación (a); la tensión que se ejerce sobre la punta de esta grieta; la deformación o desplazamiento de la probeta.

Siguiendo el procedimiento de los ensayos anteriores, vamos a emplear los mismos instrumentos:

- La carga se puede medir en este ensayo de manera directa gracias a la célula de carga disponible. Dado que vamos a emplear el mismo utillaje que en el resto de ensayos, esta podrá ser acoplada sin problema.

-La deformación, al igual que en el resto de ensayos, será medida con un sistema de video extensiométrico, dando la información directamente de la prueba.

-Por último, la longitud de la grieta será necesaria para algunos de los modelos de determinación de la energía de rotura, para medirla podremos volver a emplear el sistema de video extensiométrico.

3.2.1.4. EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS.

En este punto, necesitamos conocer la energía de fractura que se libera en este tipo de ensayo. Como ya se ha visto en los apartados teóricos, existen diferentes alternativas elegidas por los autores a la hora de conocer esta energía. Todos estos parten de los datos que hemos registrado en nuestro ensayo: la carga, la deformación y la longitud de la grieta, con los cuales realizaremos una serie de gráficas donde se enfrenten los valores: curva $P - \delta$ y curva $G - a$.

En nuestro caso, tras haber revisado distintos artículos donde se exponían las diferentes metodologías con sus ventajas e inconvenientes, hemos optado por emplear el método de reducción de datos que hemos presentado como compliance-based beam method (CBBM), con la posterior simulación numérica en un programa como ABAQUS mediante el modelo de zona cohesiva (CZM). De esta manera, procederemos de siguiente forma:

- REPRESENTACIÓN DE LOS DIAGRAMAS CARGA-DEFORMACIÓN ($P - \delta$)
- CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE FRACTURA G Y REPRESENTACIÓN DE LA CURVA-R ($G - a$)
- SIMULACIÓN COMPUTACIONAL
- CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS COHESIVOS
- IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

Tendremos por tanto:

- REPRESENTACIÓN DIAGRAMAS CARGA-DEFORMACIÓN ($P - \delta$)

Tomando de partida los datos recogidos de la prueba, tanto la carga por parte de la célula de carga, como la deformación registrada por el video extensiométrico, podremos realizar una gráfica donde se enfrente estos dos parámetros, de la forma:

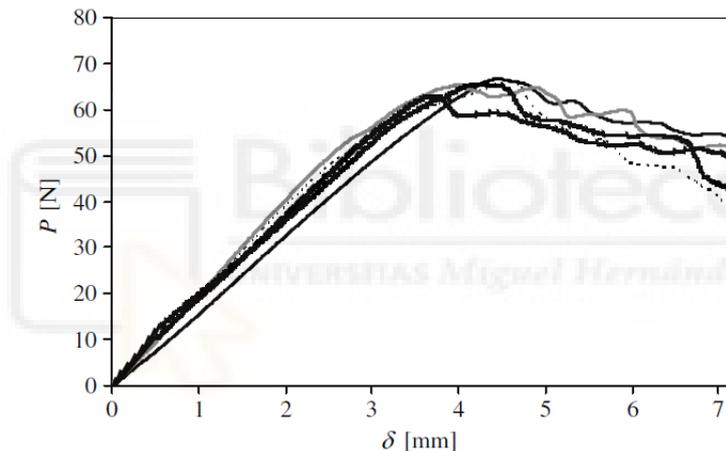


Ilustración 86: Representación de diagrama carga-deformación. De Moura, M. (2008)

- CÁLCULO ENERGÍA FRACTURA G Y CURVA-R ($G - a$)

Partiendo de los datos que hemos recogido en esta gráfica, obtendremos la energía de fractura G por medio del sistema de reducción de datos CBBM. Para el caso de modo I, hemos visto ya anteriormente que la ecuación quedará en la forma:

$$G = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}$$

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{8a^3}{Ebh^3} + \frac{12a}{5bhG}$$

A partir de las cuales podremos obtener:

$$G = \frac{6P^2}{b^2h^3} \left(\frac{2a_e^2}{E} + \frac{h^2}{5G} \right)$$

$$a_e = \frac{1}{6\alpha} A - \frac{2\beta}{A}$$

$$\alpha = \frac{8}{bh^3E}; \beta = \frac{12}{5bhG}$$

$$A = \left(\left(-108\gamma + 12 \sqrt{3 \left(\frac{4\beta^3 + 27\gamma^2\alpha}{\alpha} \right)} \right) \alpha^2 \right)^{\frac{1}{3}}$$

Las variables de estas ecuaciones serán la carga (P); las dimensiones geométricas de la probeta: espesor del sustrato (h) y el ancho de la unión (b); las propiedades mecánicas: módulo de Young del sustrato (E) y módulo de corte (G).

Después de realizar estos cálculos, podremos representar la curva-R con la energía y la apertura de la grieta, quedando de la siguiente forma:

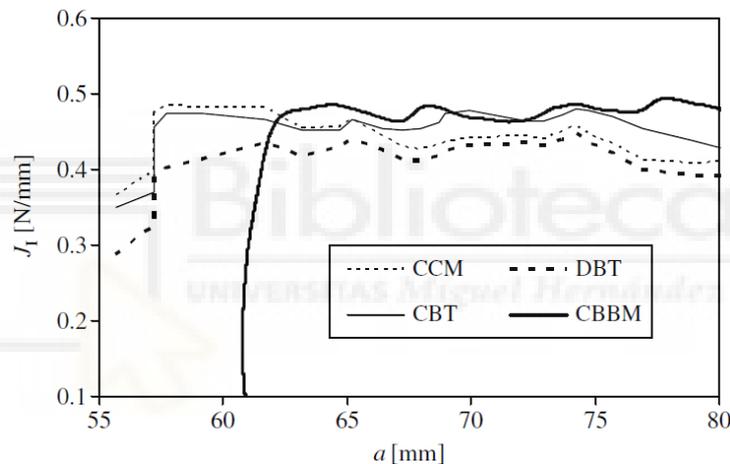


Ilustración 87: Representación de diagrama energía-apertura (curva-R). De Moura, M. (2008)

- **SIMULACIÓN COMPUTACIONAL**

Una vez que hemos realizado la parte experimental vamos a llevarla a la simulación computacional en nuestro programa de ordenador. Para ello, tras haber revisado distintas alternativas en la bibliografía, obstaremos por emplear la ley de la zona cohesiva. Como se exponía antes, para poder emplear esta ley son necesarios una serie de parámetros que la caracterizan, los cuales también tendremos que obtener de manera paralela al ensayo ya realizado. Estos parámetros serán: energía cohesiva, esfuerzo cohesivo y rigidez inicial. Su obtención se podrá realizar mediante ensayos que nos den estos valores directamente o mediante cálculo inverso, en nuestro caso, emplearemos uno u otro, dependiendo de que sea más conveniente.

• CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS COHESIVOS

Al igual que antes, basándonos en la bibliografía hemos decidido que estos parámetros van a ser obtenidos de la siguiente manera:

- Energía cohesiva:

Será el área bajo la curva de tracción-separación que caracteriza a cada ley cohesiva. Es asumible tomarla como igual a la energía crítica de deformación G_c . Para obtenerla necesitamos esta curva de tracción-separación, la cual vamos a evaluar por medio de la probeta DCB según ASTM D3433. La curva resultante del ensayo carga-desplazamiento estará dividida en tres partes: una ascensión lineal, la segunda parte donde comienza un comportamiento no lineal y se acumula el daño en la zona junto a la pre-grieta y la tercera parte donde alcanza el valor máximo y comienza a decrecer la carga con el desplazamiento. La energía se habrá obtenido anteriormente con la ecuación CBBM.

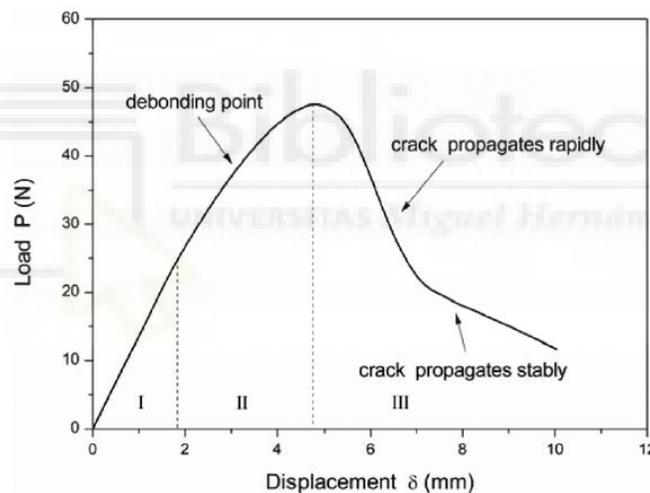


Ilustración 88: Representación curva típica deformación modo I. Zhou, Q.-C (2013)

- Esfuerzo cohesivo:

Al igual que la energía, lo podemos aproximar al esfuerzo adhesivo de la interface de la unión, medido con un ensayo de tracción. Podemos encontrarnos como en el caso de (Zhou, Q.-C (2013)) una probeta con dos rectángulos por sustrato, unidos por una capa de adhesivo en sus dos puntas, al realizar la tracción se intentará separar esta unión, dando un esfuerzo recogido con la forma:

$$\sigma_c = \frac{P_c}{A}$$

Donde P_c es la carga y A la superficie de unión

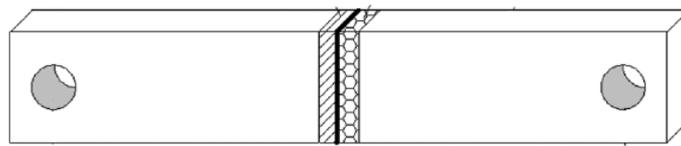


Ilustración 89: Probeta uniaxial de tracción para esfuerzo cohesivo I. Zhou, Q.-C (2013)

El ensayo será realizado de la misma forma que todos los anteriores, en la máquina de ensayos universal, empleando los utillajes y elementos de medición ya disponibles en el laboratorio.

○ Rigidez inicial:

Se podrá obtener relacionado el modulo elástico con el espesor del adhesivo. La forma habitual que hemos encontrado en la mayoría de los artículos consiste en dividir el módulo de Young entre el espesor del adhesivo empleado en el cálculo de este módulo. De esta forma, la rigidez nos quedaría con la forma:

$$K = \frac{E}{e}$$

● IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

Una vez recogidos los parámetros cohesivos y conocidas las características mecánicas de los materiales que estamos empleando, vamos a introducir toda esta información en nuestro programa de simulación para comprobar los resultados. El programa elegido para la simulación de los ensayos será de nuevo ABAQUS, en el cual deberemos implementar toda la información que disponemos:

-Diseño de las probetas de DCB en las condiciones de ensayo, simplificando el modelo al máximo para facilitar el cálculo y la aparición de errores. Se eliminarán los elementos de sujeción, medición y material innecesario, sustituyendo a estos por condiciones de restricción de movimiento, aplicación de cargas, etc.

-Introducir las propiedades del material del sustrato y las del adhesivo, extraídas de los ensayos de caracterización: modulo de Young, módulo de cortadura, compresibilidad o Poisson, al igual que la implementación del elegido modelo hiperelastico.

-Por último deberemos introducir las ecuaciones para el cálculo de la energía de rotura al programa, por medio de alguno lenguaje de programación en forma de algoritmos, para que el programa de elementos finitos pueda hacer el cálculo de las expresiones en la simulación del ensayo.

Una vez realizada la simulación en el programa informático, compararemos los resultados obtenidos de la parte experimental y la numérica, con el fin de mejorar la simulación y ajustar los parámetros con el cálculo inverso.

3.2.2. ENSAYO MODO II:

En el caso de este tipo de ensayo no existe una norma clara para la realización del mismo, por ello, como ya hemos podido ver antes, algunos autores han optado por emplear algunas de las ya disponibles en otro tipo de pruebas. En nuestro caso y dado que ya disponemos del material y la experiencia, hemos decidido realizarlo por medio de una probeta de tipo SLJ.

En ensayo de modo II requiere de una separación tangencial de los sustratos, al actuar sobre este una tracción paralela a las caras de los sustratos:

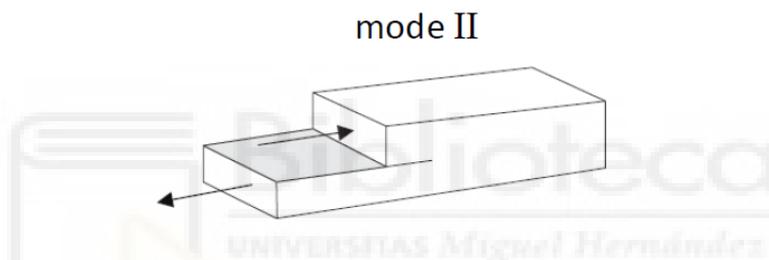


Ilustración 90: Representación apertura modo II. Chaves, F. J. P (2014)

Para ejecutar el ensayo vamos a emplear un procedimiento muy similar al anterior de modo I y de SLJ, pero incorporando algunas modificaciones.

3.2.2.1. ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO

La probeta que emplearemos para este ensayo es de tipo SLJ, esta geometría ya ha sido descrita anteriormente, sin embargo, lo que hemos podido observar de algunos autores, es que modifican ligeramente el espécimen para que tenga lugar este modo II de rotura. La probeta contará con las dos pletinas metálicas unidas mediante un solape por medio de una capa de adhesivo, pero en esta ocasión, se le realiza una pequeña fisura al adhesivo, una vez curado, para que actúe como punto de inicio de la grieta en el fallo y podamos contemplar el modo II del fallo. Estas probetas se construirán al igual que las empleadas para el módulo de corte, empleando también el útil ya diseñado:

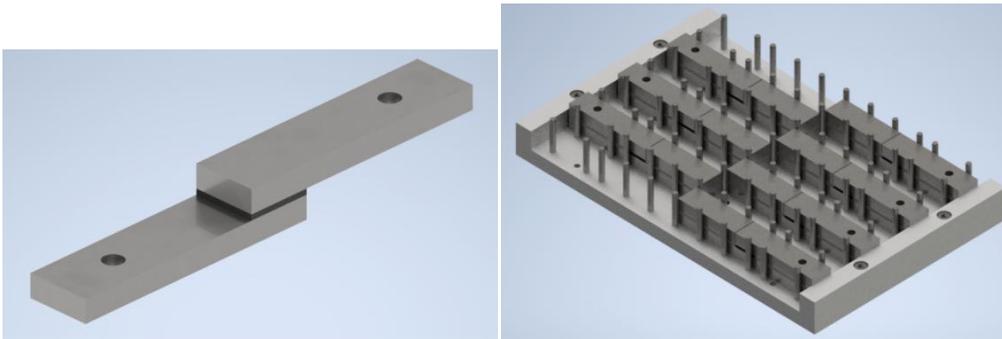


Ilustración 91: Probeta diseño propio modo II.

3.2.2.2. DISEÑO DE LOS UTILLAJES

Gracias al uso de este tipo de probeta, los utillajes para la ejecución de ensayo vuelven a ser repetidos, logrando el ahorro de trabajo y costes. Para este tipo de probetas disponemos de la mordaza con pasador diseñada para acoplar estas probetas a la máquina universal de ensayos:

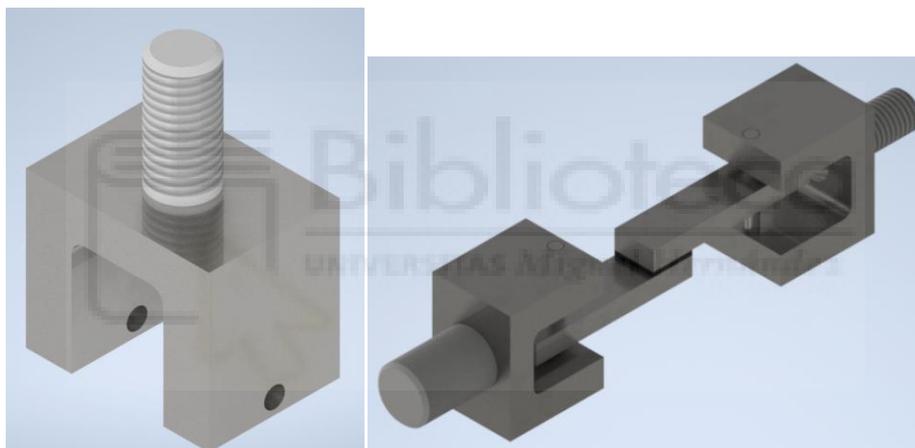


Ilustración 92: Utillaje para probetas de modo II.

3.2.2.3. EJECUCIÓN DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS.

Las condiciones del laboratorio continúan siendo estándares, temperatura ambiente y humedad de la habitación. Con respecto a la velocidad, al igual que para el modo I, comenzaremos con 1 mm/min.

En el ensayo necesitamos medir los mismos parámetros que en el anterior: longitud de la grieta durante su propagación (a); la carga aplicada sobre la probeta; la deformación o desplazamiento de la probeta.

Siguiendo el procedimiento de los ensayos anteriores, vamos a emplear los mismos instrumentos:

-La carga se puede medir en este ensayo de manera directa gracias a la célula de carga disponible. Dado que vamos a emplear el mismo utillaje que en el resto de ensayos, esta podrá ser acoplada sin problema.

-La deformación, al igual que en el resto de ensayos, será medida con un sistema de video extensiométrico, dando la información directamente de la prueba.

-Por último, la longitud de la grieta será necesaria para algunos de los modelos de determinación de la energía de rotura, para medirla podremos volver a emplear el sistema de video extensiométrico.

3.2.2.4. EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS

En este tipo de ensayo necesitamos obtener la energía de rotura del adhesivo, sometido al tipo de esfuerzo seleccionado. Al igual que en el resto de ensayos, vamos a tener información de carga, deformación y longitud de apertura de grieta, valores a partir de los cuales podremos determinar, con la expresión correspondiente, la energía de la rotura. Para ello será necesario realizar las gráficas donde se enfrenten los valores: curva $P - \delta$ y curva $G - a$.

Para este tipo de rotura, no podemos emplear el mismo procedimiento que para el modo I, esta vez se ha optado por emplear el método de la integral J, con la posterior simulación numérica en un programa como ABAQUS mediante el modelo de zona cohesiva (CZM). De esta manera, procederemos de siguiente forma:

- REPRESENTACIÓN DE LOS DIAGRAMAS CARGA-DEFORMACIÓN ($P - \delta$)
- CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE FRACTURA G Y REPRESENTACIÓN DE LA CURVA-R ($G - a$)
- SIMULACIÓN COMPUTACIONAL
- CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS COHESIVOS
- IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

Tendremos por tanto:

- REPRESENTACIÓN DIAGRAMAS CARGA-DEFORMACIÓN ($P - \delta$)

Tomando los datos recogidos del ensayo experimental de modo II como punto de partida, realizamos la gráfica donde quedan enfrentados la carga y la deformación, similar a:

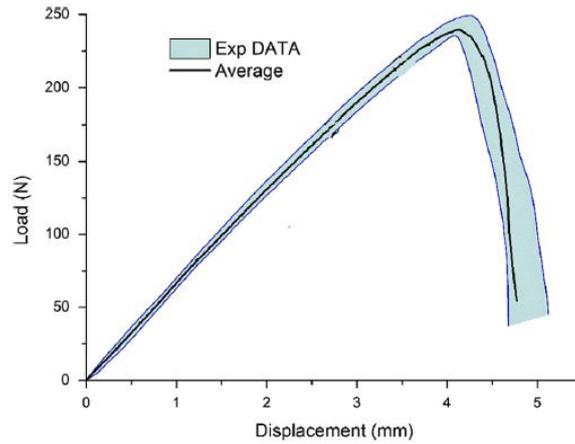


Ilustración 93: Diagrama carga-deformación de probeta modo II. Niu, R.-M (2014)

- CÁLCULO ENERGÍA DE FRACTURA G Y CURVA-R ($G - a$)

En el caso del modo II, se ha decidido emplear el ensayo con la probeta SLJ, por lo que los métodos de reducción de datos quedan descartados en este punto. Para obtener la energía de rotura G de este tipo de rotura se empleará el método descrito en Hasegawa, K (2015). Por medio del programa de simulación numérica como ABAQUS podemos hacer uso de la integral J y obtener así la energía de la rotura bajo la curva de carga-deformación. En la ilustración 94 se presenta la probeta del ensayo en el programa de simulación numérica, en este caso el autor a introducido una pregrieta para lograr el fallo de modo II

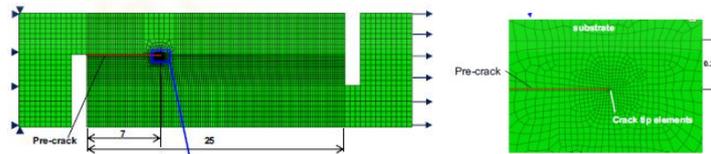


Ilustración 94: Modelo simulación numérica para probeta modo II. Hasegawa, K (2015) Parte 1

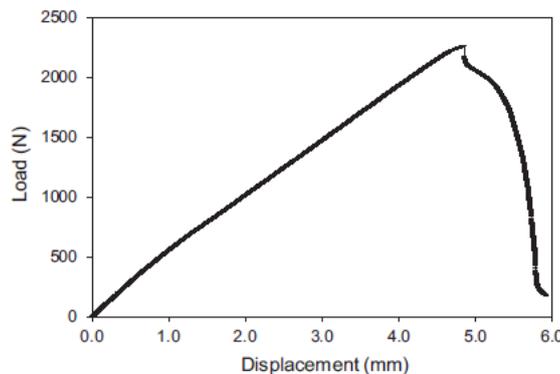


Ilustración 95: Representación carga-desplazamiento probeta TAST. Hasegawa, K (2015) Parte 1

Después de realizar estos cálculos, podremos representar la curva-R con la energía y la apertura de la grieta, quedando de la siguiente forma:

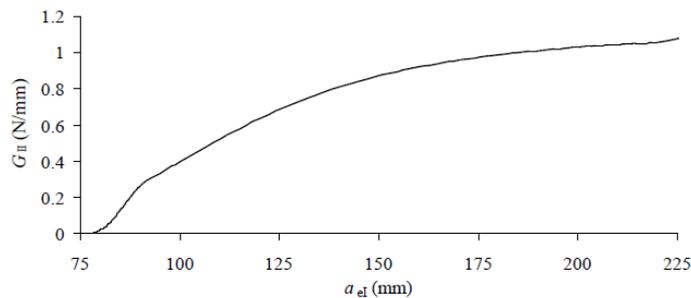


Ilustración 96: Diagrama energía-apertura (curva-R). Chaves, F. J. P (2012)

- **SIMULACIÓN COMPUTACIONAL**

De forma idéntica al ensayo de modo I, para esta ocasión haremos uso de la ley de la zona cohesiva. Para poder implementarla en los programas de ordenador necesitaremos conocer los parámetros que la caracterizan. Al igual que para el modo I, estos parámetros son: energía cohesiva, esfuerzo cohesivo y rigidez inicial; y se podrán obtener de nuevo, mediante ensayos que muestren directamente el valor, o mediante cálculo inverso, en nuestro caso, emplearemos uno u otro, dependiendo de que sea más conveniente. (El procedimiento será tomado del apartado anterior)

- **CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS COHESIVOS**

Al igual que antes, basándonos en la bibliografía hemos decidido que estos parámetros van a ser obtenidos de la siguiente manera:

- **Energía cohesiva:**

Será obtenida del área bajo la curva de tracción-separación. Tomaremos como dato inicial la energía crítica de deformación G_c , para obtenerla haremos uso de la curva de tracción-separación, extraída del ensayo experimental con la probeta de modo II, como se ha explicado antes, esta se ha calculado por medio de la integral J, al igual que en Hasegawa, K (2015) Parte 1.

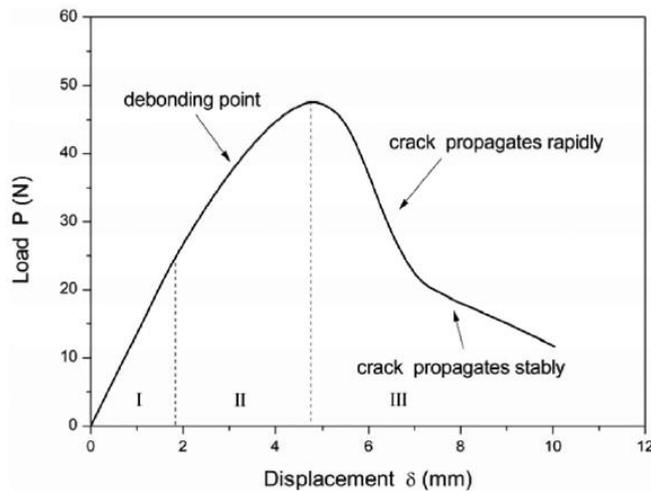


Ilustración 97: Representación curva típica deformación modo II. Zhou, Q.-C (2013)

- IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

De igual forma que para la rotura de modo I, tras obtener los parámetros cohesivos y conocidas las características mecánicas de los materiales que estamos empleando, debemos introducir toda esta información en nuestro programa de simulación para comprobar los resultados. El programa elegido para la simulación de los ensayos será de nuevo ABAQUS, en el cual implementaremos todos los datos que hemos obtenido en los anteriores ensayos:

- Al igual que en el documento Hasegawa, K (2015) Parte 2, se diseña de las probetas de SLJ en las condiciones de ensayo, simplificando el modelo al máximo para facilitar el cálculo y la aparición de errores. Se eliminarán los elementos de sujeción, medición y material innecesario, sustituyendo a estos por condiciones de restricción de movimiento, aplicación de cargas, etc.

- Introducir las propiedades del material del sustrato y las del adhesivo, extraídas de los ensayos de caracterización: módulo de Young, módulo de cortadura, compresibilidad o Poisson, al igual que la implementación del elegido modelo hiperelástico.

- Por último simularemos el ensayo para obtener la tracción máxima, característica de la zona cohesiva y con ella poder evaluar la energía. Siguiendo con el ejemplo de Hasegawa, K (2015), donde se evalúan un total de tres tracciones, comparando estas con la curva obtenida de la integral J (ilustración 94), con bastantes similitudes:

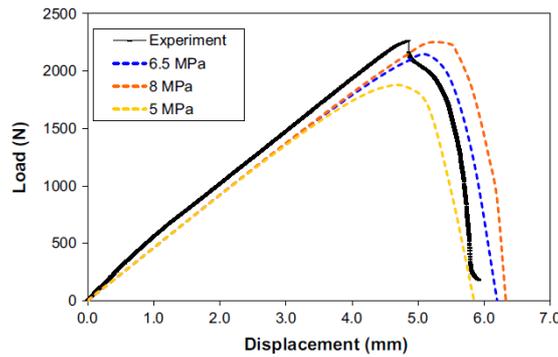


Ilustración 98: Comparación modelo experimental con simulación.

Tras la simulación informático, compararemos los resultados de ambos ensayos, tanto con integral J como con el modelo de zona cohesiva, pudiendo mejorar las condiciones del ensayo y ajustar los parámetros con el cálculo inverso.

3.2.3. ENSAYO ROTURA MATERIAL HIPERELÁSTICO

Como se ha expuesto tras la revisión bibliográfica, no existe un ensayo único para el caso de los materiales hiperelásticos. Hemos visto como en función de que trabajos consultemos pueden encontrarse probetas bastante similares. Tras haber realizado los ensayos previos de caracterización y rotura y, con el fin de poder emplear el material diseñado y elaborado para ello, hemos optado por caracterizar la rotura en este tipo de materiales con las probetas que encontramos en Guo, H (2019), Hocine, N. A (2002) o Thomas. A. G (1994). Estos autores han empleado las mismas probetas que servían para la caracterización mecánica del adhesivo, a las que se les añade una pequeña pre-grieta, y se han llevado hasta la rotura para ver como se comporta el crecimiento de la grieta hasta la fractura en dicho material hiperelástico.

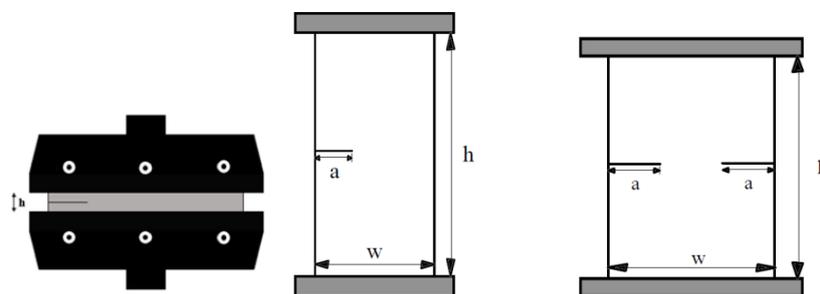


Ilustración 47 y 48

Como podemos apreciar tenemos tres probetas apenas diferenciadas, bastante similares al ensayo de tensión plana y tensión uniaxial ya realizado en el apartado de obtención de las constantes hiperelásticas.

3.2.3.1. ELABORACIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO

Tanto las probetas para la prueba de tensión plana como de hueso de perro ya han sido descritas en los apartados previos. De forma resumida, debemos elaborar láminas del material hiperelástico, por medio del útil diseñado en el laboratorio (Ilustración 51) y cortarla para poder ser dispuesta en los útiles de ensayo:

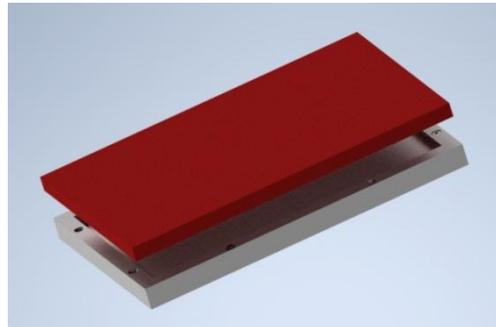


Ilustración 51

-Tensión plana: siguiendo el trabajo de Guo, H (2019), las láminas deben tener un espesor de 1 mm, una L de 100 mm y una h de 10 mm en la parte que sufre la deformación, pero además debemos dejar suficiente material para la sujeción en las mordazas. Cogiendo los datos de Guo, H (2019), comenzaremos nuestra prueba con una pregrieta de 15mm de longitud.



Ilustración 99: probeta tensión plana con pre-grieta. Guo, H (2019)

-SENT: como se expresa en Hocine, N. A (2002) y Hocine, N. A (1998) la probeta de SENT no es más que una lámina de adhesivo estrecha, sujeta por dos pletinas metálicas en sus extremos y con la pregrieta en el centro para lograr la rotura al someterse a la tracción. Las dimensiones de esta probeta son extraídas del artículo Hocine, N. A (1998), partiendo de la ilustración 48 tendremos las dimensiones:

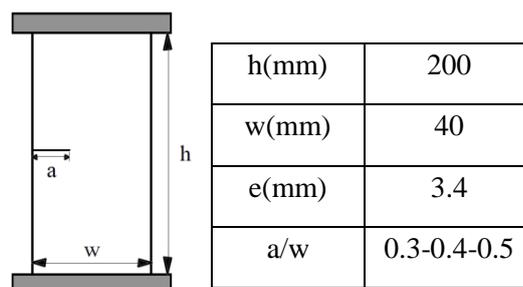


Ilustración 48

Como vemos en las ilustraciones 47 y 48, el autor realiza una pregrieta para que sirva de camino para el crecimiento hasta la rotura.

3.2.3.2.DISEÑO DE LOS UTILLAJES

Estas láminas serán sujetadas por medio de dos pletinas metálicas en cada uno de su extremo horizontal, de la misma manera que hemos realizado el ensayo de hueso de perro. Para poder sujetar las probetas en la máquina universal de ensayos vamos a emplear nuestros útiles diseñados en forma de U, las pletinas que sujetan el material hiperelástico serán ancladas por medio de un tornillo a las dos mordazas y estas a su vez instaladas en el puente y la base de la máquina de ensayos:

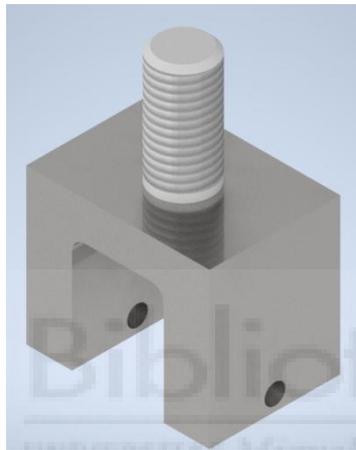


Ilustración 74

3.2.3.3.EJECUCIÓN DE ENSAYO Y TOMA DE DATOS

Mantenemos las condiciones de temperatura y la humedad del resto de experimentos, la velocidad de ejecución de este ensayo, tomada de algunos de los artículos revisados estará entorno a 10 mm/min.

Para medir la deformación y crecimiento de la grieta se podrá seguir empleando el sistema de video etensiométrico visto hasta ahora, pudiendo servir de ayuda incorporar contrastes de color sobre el del material hiperelástico para visualizar mejor el resultado.

Finalmente es la célula de carga quien nos aportará los datos de la fuerza ejercida por la máquina para poder calcular la tensión en la probeta

3.2.3.4.EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS

Queremos conocer la energía liberada en la fractura del material. Como las diferentes alternativas que nos encontramos en la bibliografía, partimos de los datos de deformación, carga y longitud de la grieta en cada instante. A partir de estos datos se pueden representar gráficas de $P - \delta$ y $G - a$.

○ REPRESENTACIÓN DE LOS DIAGRAMAS CARGA-DEFORMACIÓN ($P - \delta$)

Para la representación de este diagrama podremos emplear los datos directos obtenidos del ensayo. Como podemos apreciar en la representación de la ilustración 100, la deformación del material es coherente con los datos obtenidos en deformaciones sin grietas, pero una vez alcanzado un valor de deformación máxima, la grieta rompe por completo la probeta provocando el cese de la carga.

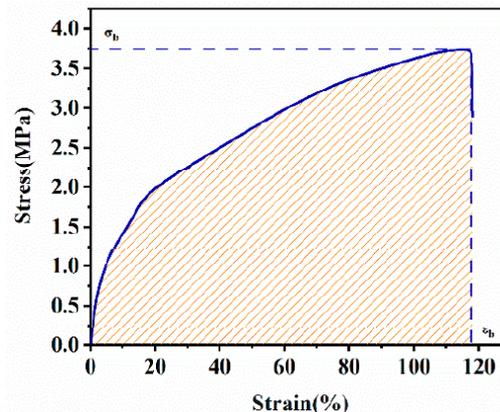


Ilustración 100: diagrama tensión-deformación tensión plana. Guo, H (2019)

○ CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE FRACTURA G Y REPRESENTACIÓN DE LA CURVA-R ($G - a$)

Como se ha expuesto antes, en el cálculo de la energía los distintos autores han hecho uso de la integral J y la teoría de Tearing o energía de desgarro. Siguiendo con la metodología de los ensayos previos, realizaremos la simulación en el programa de elementos finitos con la integral J y compararemos los resultados con la energía de desgarro.

-Empleando la formulación expuesta en Guo, H (2019) y Hocine, N. A (1998), partimos de la expresión para la energía de desgarro crítica en tensión plana:

$$T_c = Wxh$$

Donde W es la densidad de energía y h la dimensión de la probeta. La densidad de energía se extrae de la integral del área de la curva de tensión-deformación y podemos obtener un valor de energía de rotura crítica.

-Por otro lado, el ensayo se representa en el programa de elementos finitos ABAQUS. Siguiendo las recomendaciones de otros ensayos, se elimina toda aquella información que no resulte relevante para el ensayo y se establece un mallado de menor a mayor

desde la punta de la grieta hasta todo el ensayo, fijamos las condiciones de carga y de límite de movimiento y podemos simular en ensayo

Los resultados experimentales y simulados se podrán comparar con el fin de comprobar cuanto de representativo hemos logrado hacer nuestro modelo.



4. CONCLUSIÓN

Una vez completado este trabajo, podemos ver a modo de introducción los conceptos necesarios para entender futuras investigaciones relacionadas con los adhesivos. Además, enfocado al tema concreto que nos concierne, qué son las uniones adhesivas, que debemos saber acerca de ellas y por que suscitan nuestro interés. Tomando estas bases como punto de partida, estaremos en disposición de realizar una extensa revisión bibliográfica de todos aquellos trabajos, publicaciones, artículos, etc., que nos susciten interés por su aportación en el camino de la investigación de las uniones adhesivas con comportamiento hiperelásticos. Como hemos expresado a lo largo de todo el trabajo, el estudio de los adhesivos, las uniones y en comportamiento de los materiales hiperelásticos en general, no es una tarea sencilla. Encontramos trabajos desde principios del siglo XX donde se han trabajado con las probetas de los materiales hiperelásticos, no solo por parte de adhesivos, sino en gomas, caucho, neumáticos, etc. El objetivo desde el principio será el intento por caracterizar el comportamiento de este tipo de material, tanto en su comportamiento de deformación como en la rotura.

Unos de los factores clave que encontramos en nuestra revisión, a la hora de mejorar el estudio del material, es la incorporación de los programas informáticos de simulación, que encontraremos presentes en cualquier trabajos desde el inicio del siglo XXI, siendo por tanto en nuestro desarrollo del trabajo, otra parte vital.

Tras realizar esta revisión bibliográfica, hemos realizado una descripción a modo de aglutinamiento o resumen, empleado toda la información clave que se ha ido encontrando en los distintos trabajos previos, de esta forma, logramos tener una explicación tanto de la caracterización mecánica como de la caracterización a la fractura en los adhesivos de carácter hiperelástico y las uniones que se pueden ejecutar con el mismo. Esto servirá como punto de partida y documento base para posibles futuros trabajos e investigaciones a cerca de los materiales hiperelásticos o las uniones, ya sea para profundizar en los temas tratados o para ampliarlo con nuevos conocimientos.

Así mismo, con idea de poder realizar nuestra propia caracterización de materiales en el laboratorio, se ha realizado un plan de ensayo para este fin. De igual forma que para la investigación teórica, hemos querido diferenciar en esta parte las pruebas necesarias para realizar la caracterización mecánica del material, de las pruebas para evaluar la rotura de las uniones con los adhesivos. Dado el contexto actual, era

imposible llevar a cabo la realización de las pruebas descritas en el laboratorio de la universidad, por lo que este documento quedará a la espera de en un posterior trabajo poder llevarse a la práctica, pudiendo así extraer las conclusiones a partir de la propia experiencia, mejorar los procedimientos y cumplimentarlo. Además, al igual que en la primera parte, el trabajo quedará como el punto de partida para ir ensayando materiales, diseñando nuevas probetas, modificando las condiciones del ensayo o mejorando los sistemas, para futuras investigaciones.

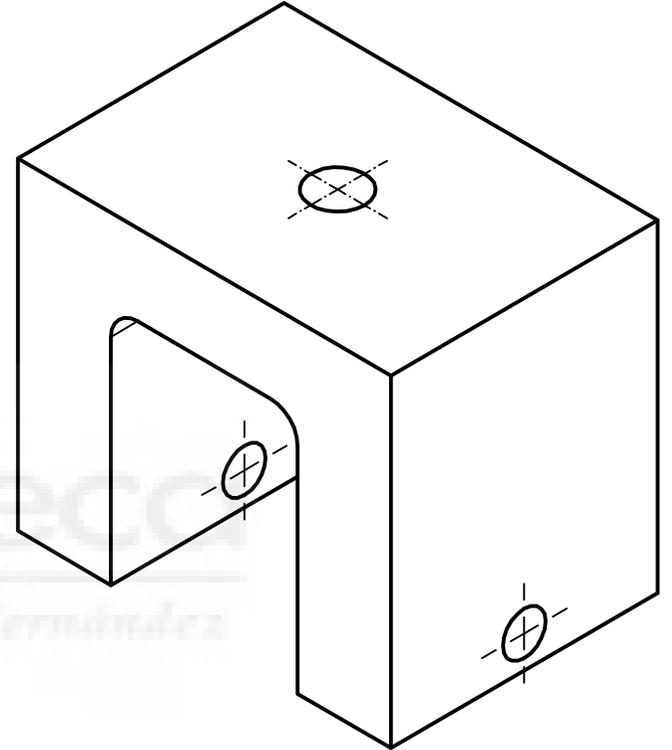
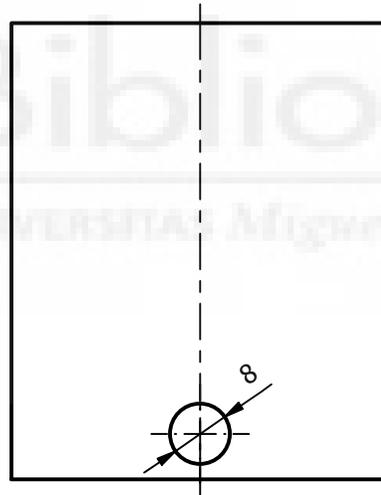
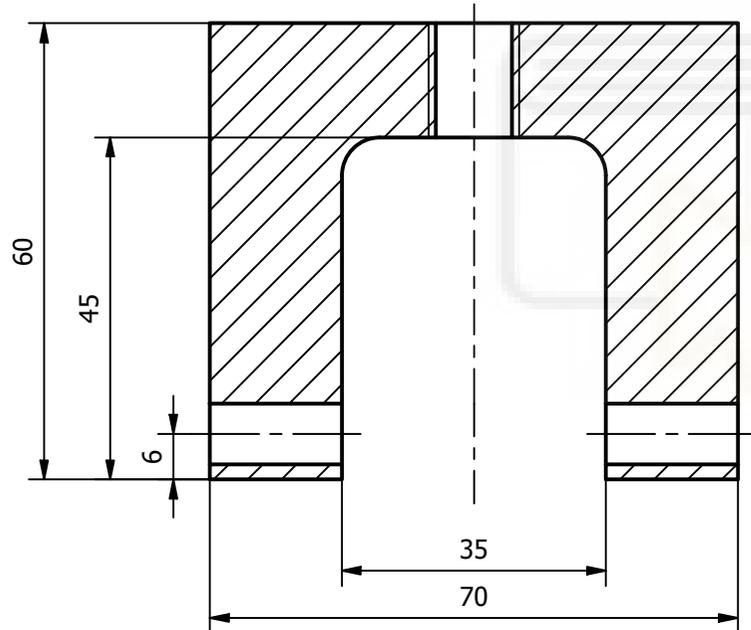
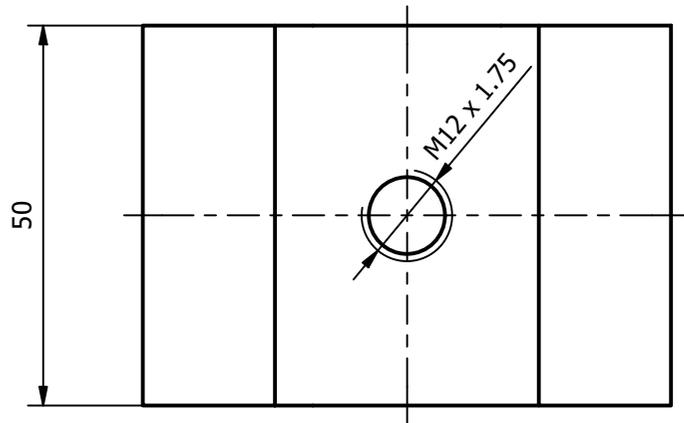


5. ANEXO

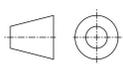
5.1 PLANOS

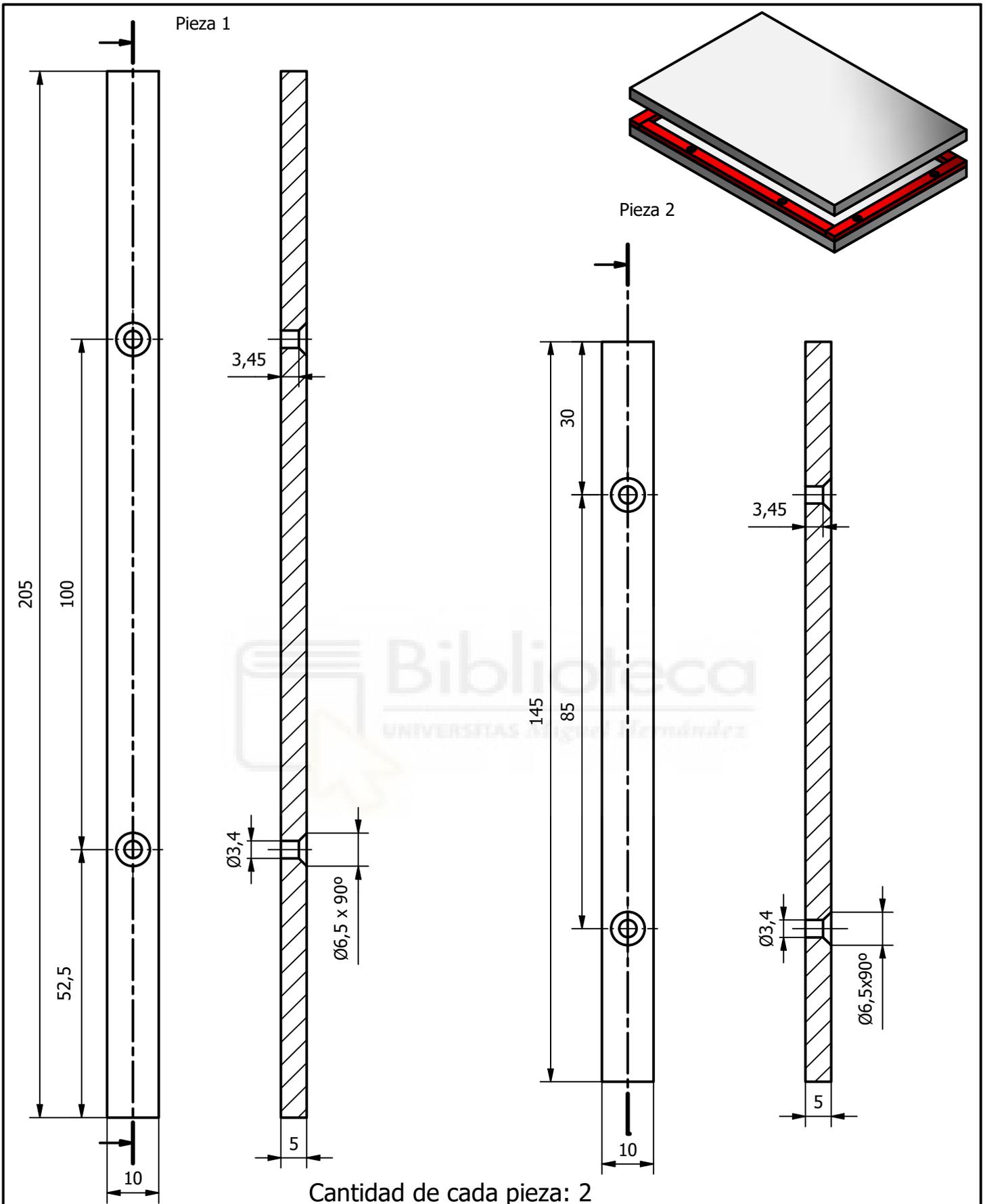
A continuación se muestran los planos de las probetas y utillajes que se han diseñado en este trabajo para poder efectuar los ensayos descritos. A modo de índice los hemos clasificado como:

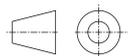
- 5.1.1. Útil montaje de probetas en máquina de tracción:
 - 5.1.1.1. Plano 1: Soporte para probetas en máquina de ensayo universal
- 5.1.2. Útil lámina adhesivo
 - 5.1.2.1. Plano 2: Barras separadoras
 - 5.1.2.2. Plano 3: Base montaje
 - 5.1.2.3. Plano 4: Parte superior
- 5.1.3. Plano5: Útil montaje probetas
 - 5.1.3.1. Plano 6: Base
 - 5.1.3.2. Plano 7: Pletina lateral
 - 5.1.3.3. Plano 8: Tapa
 - 5.1.3.4. Plano 9: Sustrato inferior probeta tipo 2
 - 5.1.3.5. Plano 10: Separador probeta tipo 2
 - 5.1.3.6. Plano 11: Parte inferior y superior probeta tipo 1

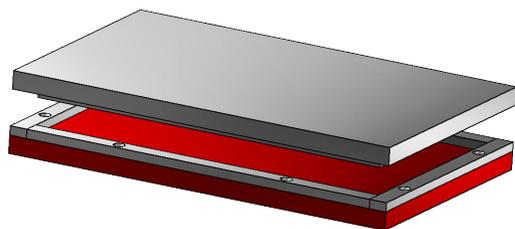
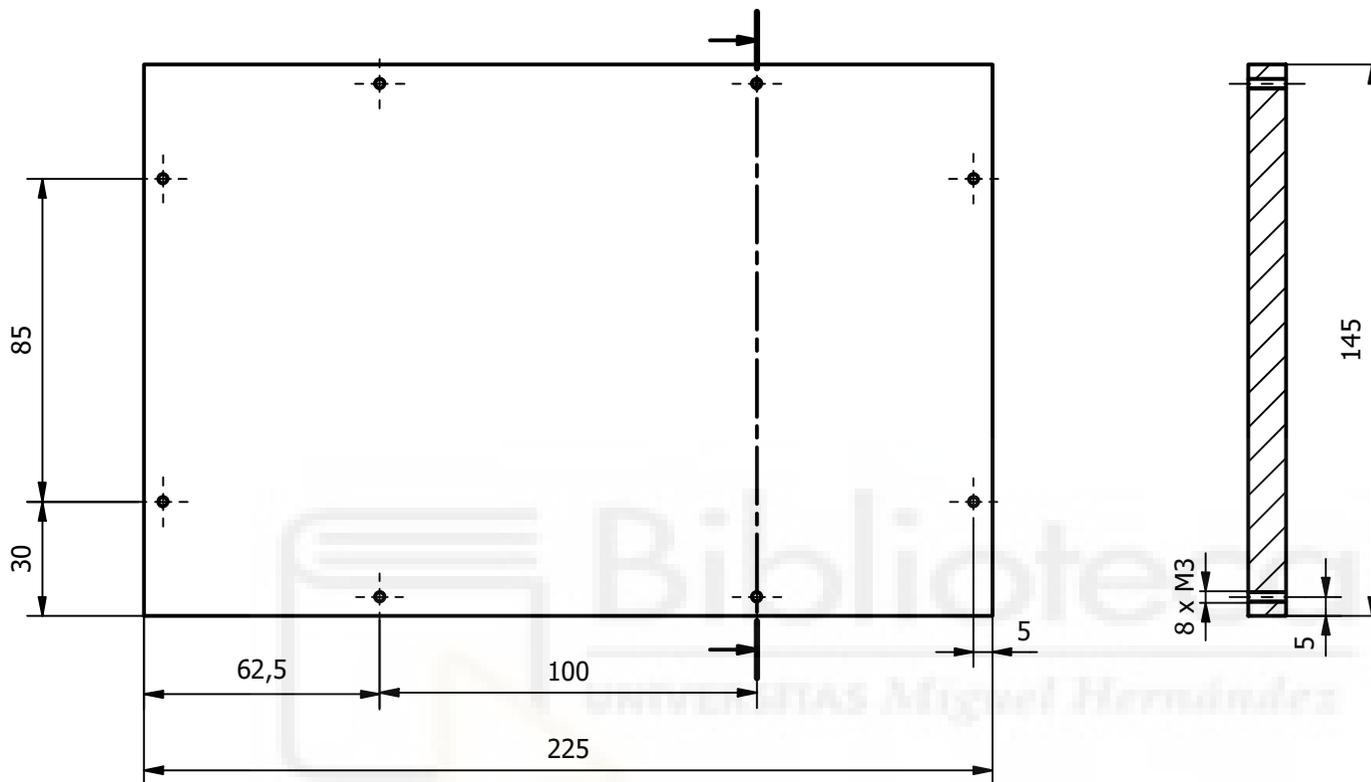


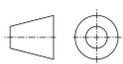
Fabricar 2 unidades de esta pieza.

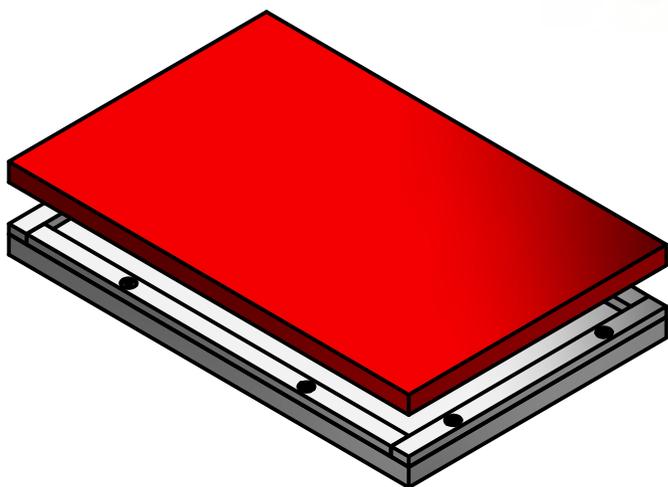
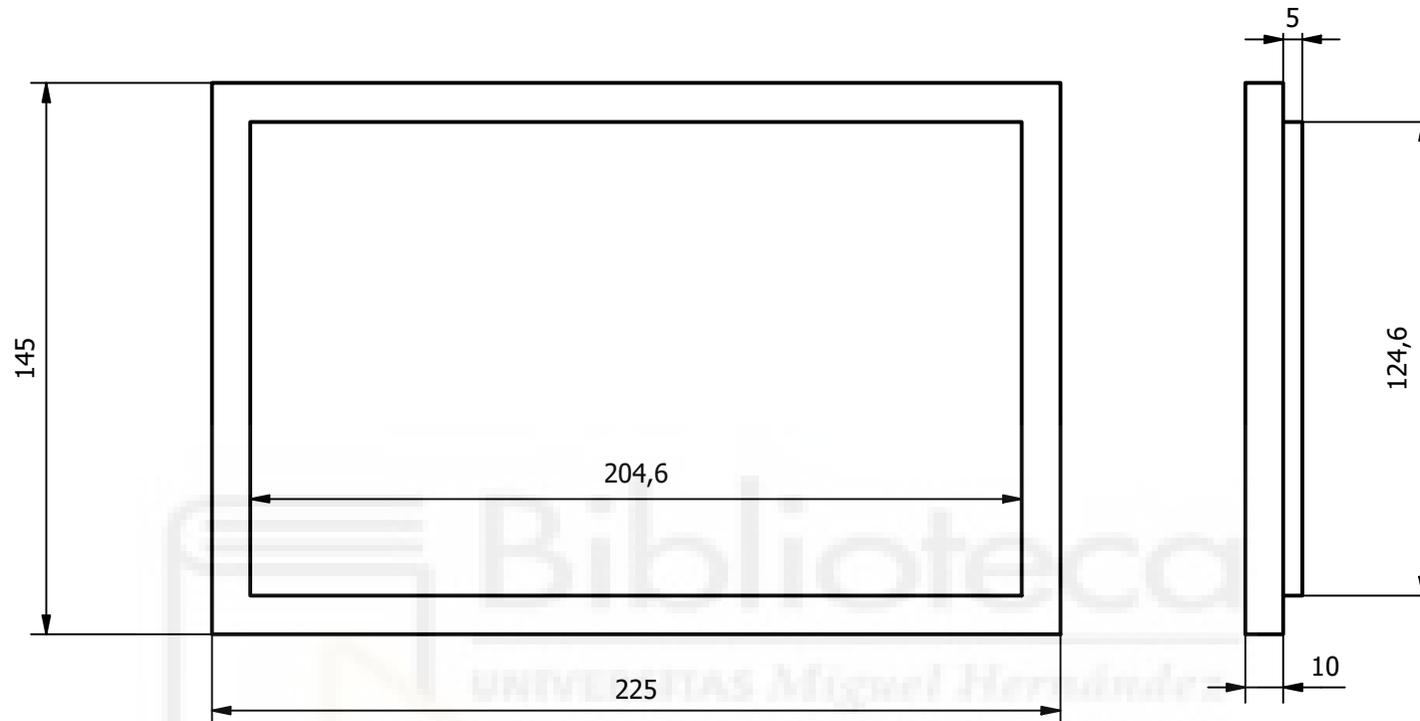
FECHA CREACIÓN: 03/03/2020	TITULO DEL PROYECTO: Utiles montaje máquina tracción				
EMPRESA Y LOGO COMERCIAL: Universidad Miguel Hernández	DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA: P08-Soporte probeta ; Material: Acero, carbono (Masa=1,011 kg)				
	AUTOR: Andrés Robles Navarro		ESCALA 1 : 1	Tamaño hoja A4	Nº de hoja 1



FECHA CREACIÓN: 21/01/2020	TÍTULO DEL PROYECTO: Útil fabricación láminas adhesivo			
EMPRESA Y LOGO COMERCIAL: Universidad Miguel Hernández 	DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA: Barras; Material: Aluminio 6061 (Masa P1=0,027 kg; Masa P2=0,019 kg)			
AUTOR: Andrés Robles Navarro		ESCALA 1 : 1	Tamaño hoja A4	Nº de hoja 3



FECHA CREACIÓN: 19/05/2020	TITULO DEL PROYECTO: Útil fabricación láminas adhesivo		
EMPRESA Y LOGO COMERCIAL: Universidad Miguel Hernández	DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA: Base montaje; Material: Aluminio 6061 (Masa=0,88 kg)		
	AUTOR: Andrés Robles Navarro		ESCALA 1 : 2
		Tamaño hoja A4	Nº de hoja 1



FECHA CREACIÓN:
19/05/2020

EMPRESA Y LOGO COMERCIAL:
Universidad Miguel Hernández



TITULO DEL PROYECTO:
Útil fabricación láminas adhesivo

DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA:
Tapa montaje; Material: Aluminio 6061 (Masa=1,225 kg)

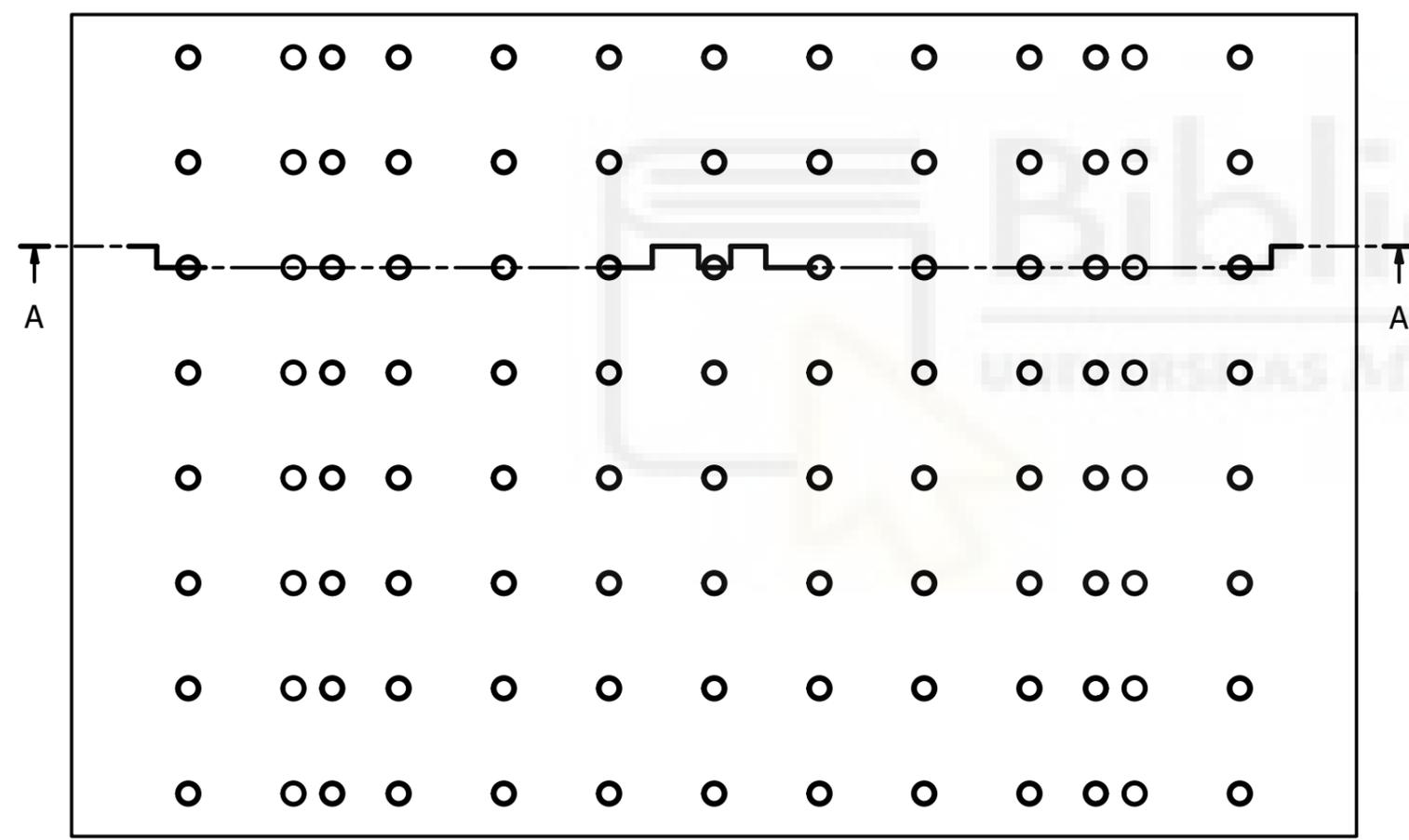
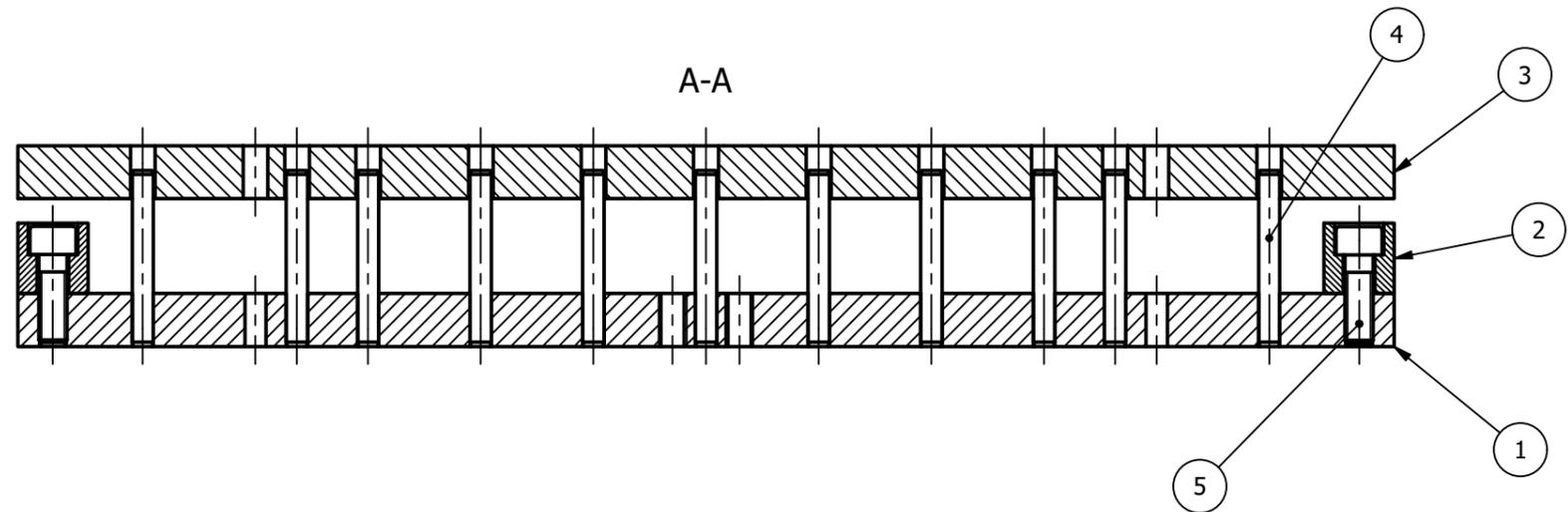
AUTOR:
Andrés Robles Navarro



ESCALA
1 : 2

Tamaño hoja
A4

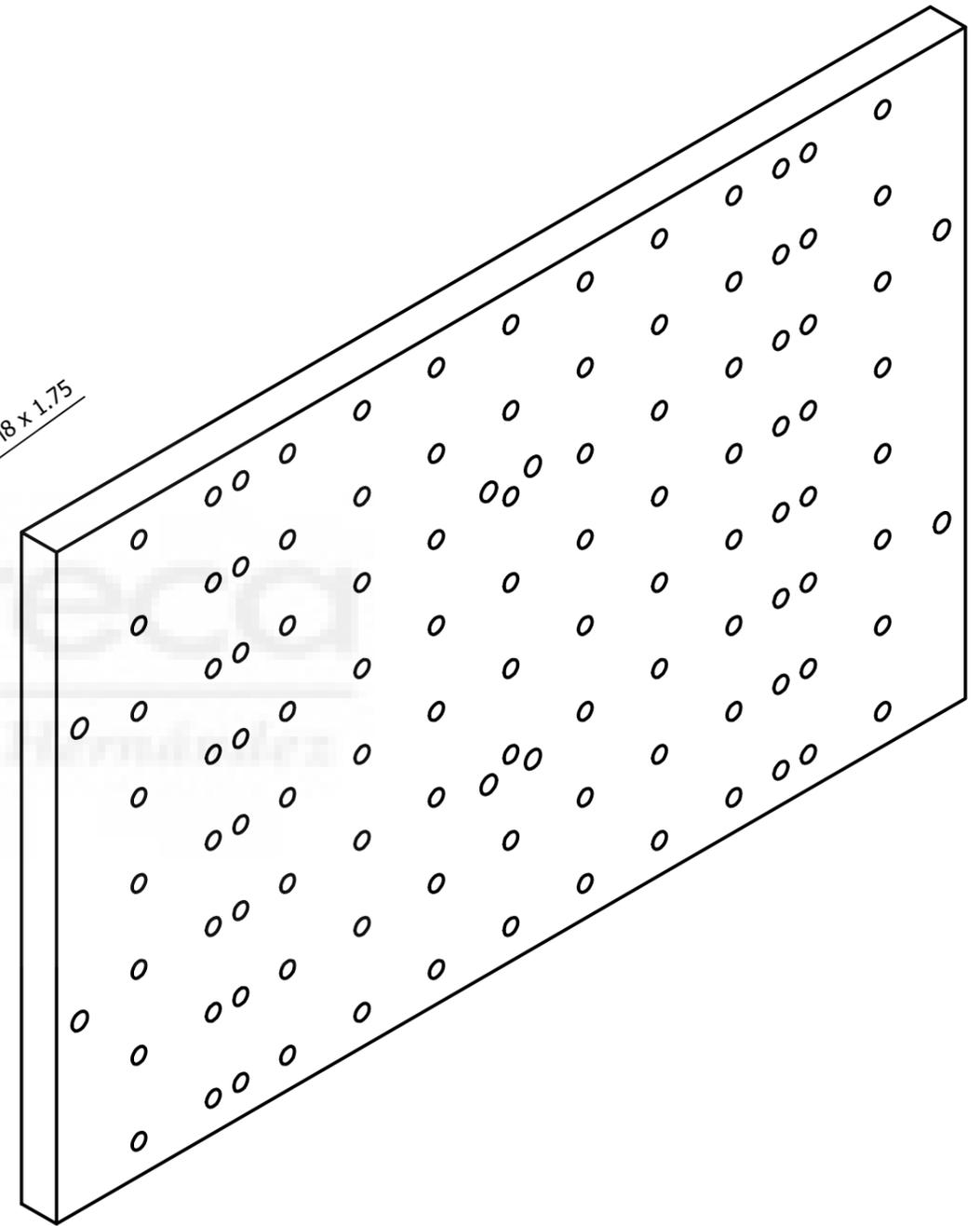
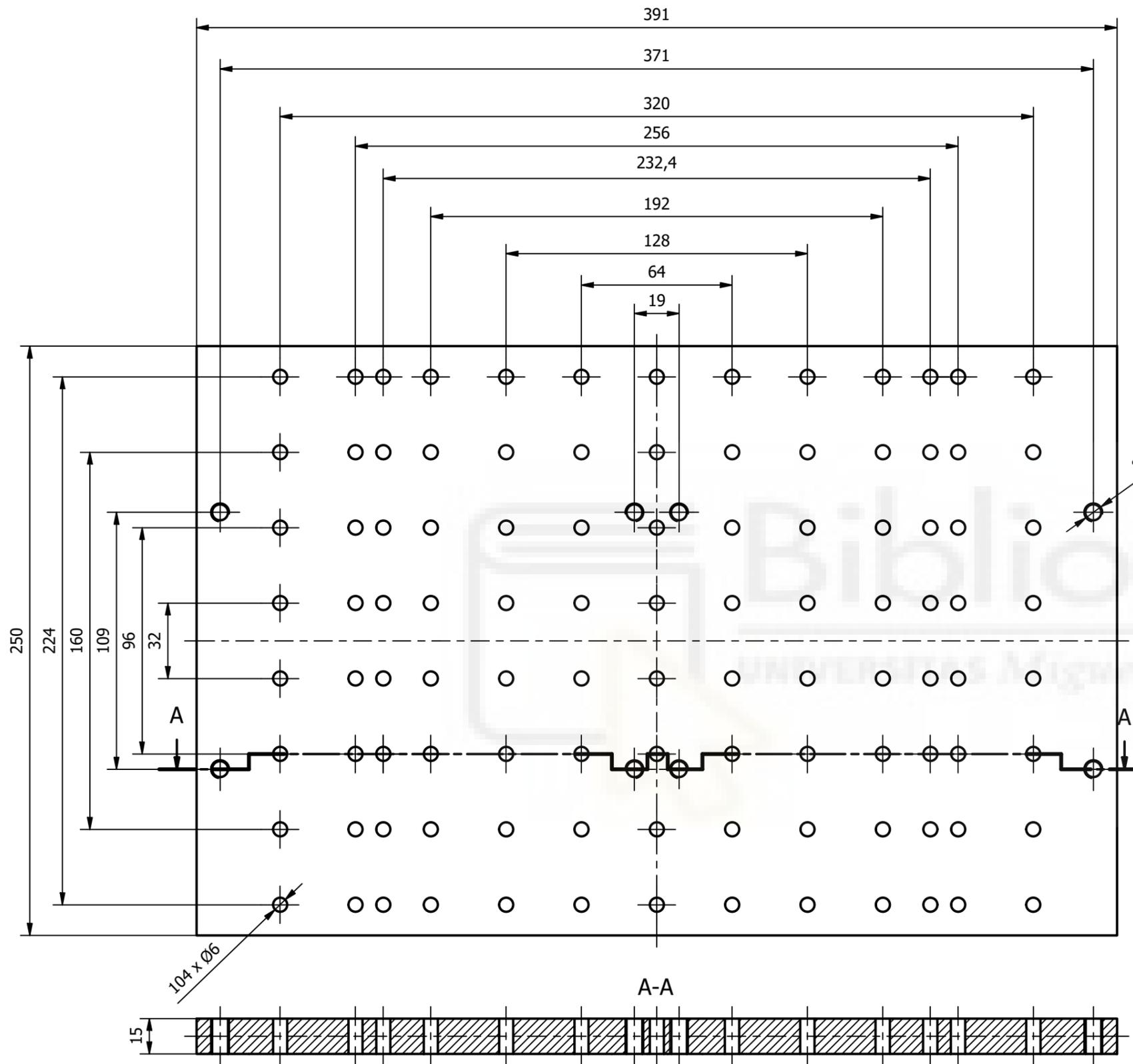
Nº de hoja
2



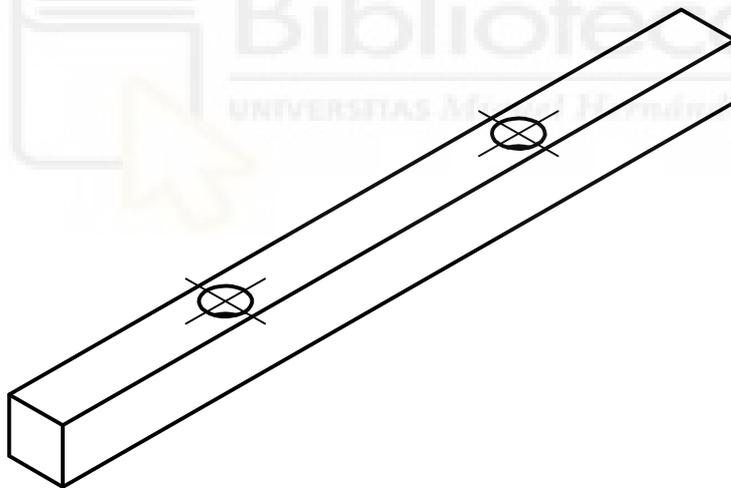
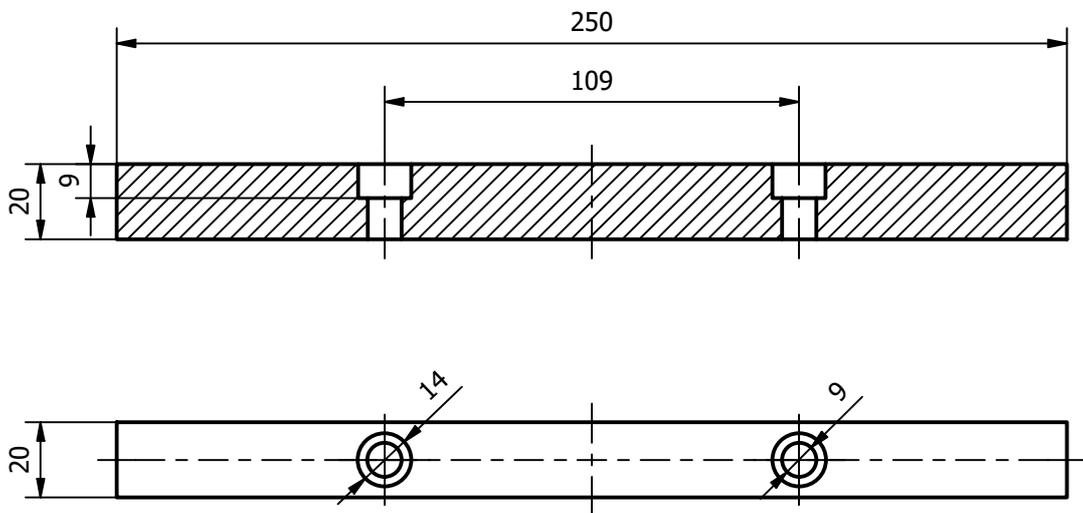
5	6	ISO 4762 - M8 x 12	Tornillo de cabeza cilíndrica con hueco hexagonal	Acero inoxidable, 440C	0,02 kg
4	88	ISO 2338 - 6 h8 x 60	Pasador cilíndrico	Acero inoxidable, austenítico	0,01 kg
3	1	P03-Tapa	P03-Tapa	Aluminio 6061	3,80 kg
2	3	P02-Pletina lateral	P02-Pletina lateral	Aluminio 6061	0,26 kg
1	1	P01-Base	P01-Base	Aluminio 6061	3,83 kg
Ref.	Nº	Nº de plano/Norma	Descripción	Material	MASA

FECHA CREACIÓN: 08/01/2020		TÍTULO DEL PROYECTO: Útil de montaje de probetas			
EMPRESA Y LOGO COMERCIAL: Universidad Miguel Hernández		DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA: C01-Panel de montaje probetas ; Material: (Masa=9,41 kg)			
AUTOR: Andrés Robles Navarro		ESCALA 1 : 2	Tamaño hoja A3	Nº de hoja 1	



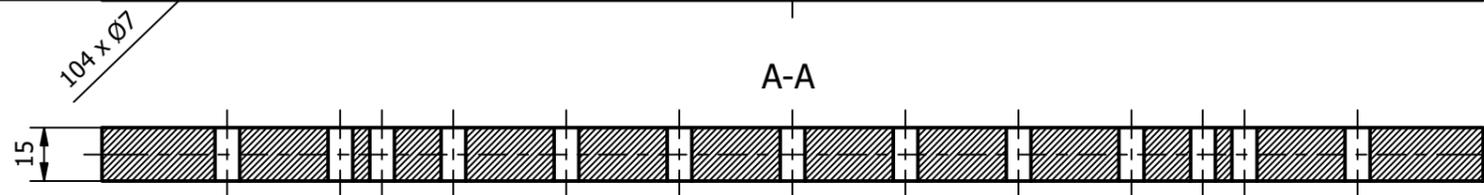
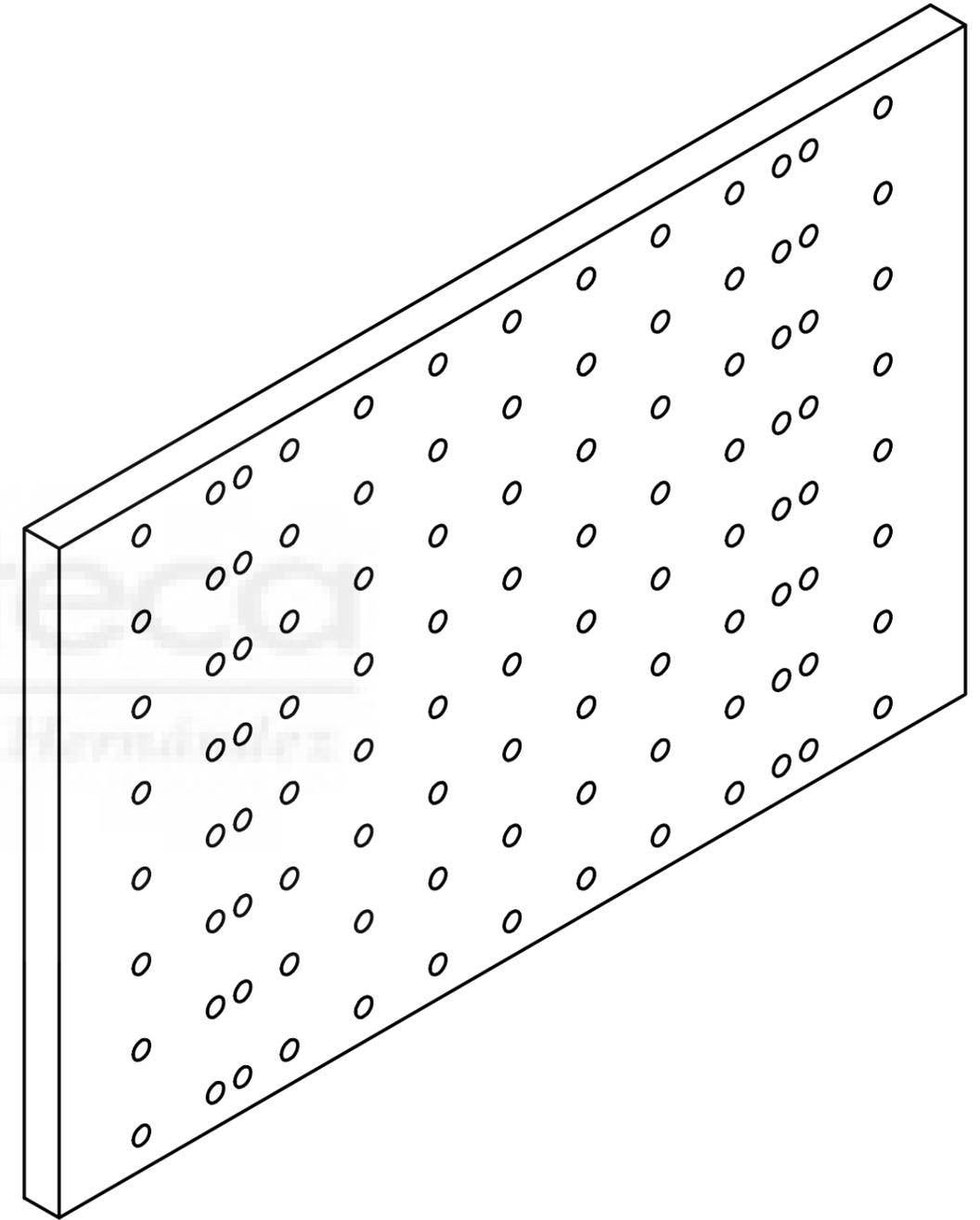
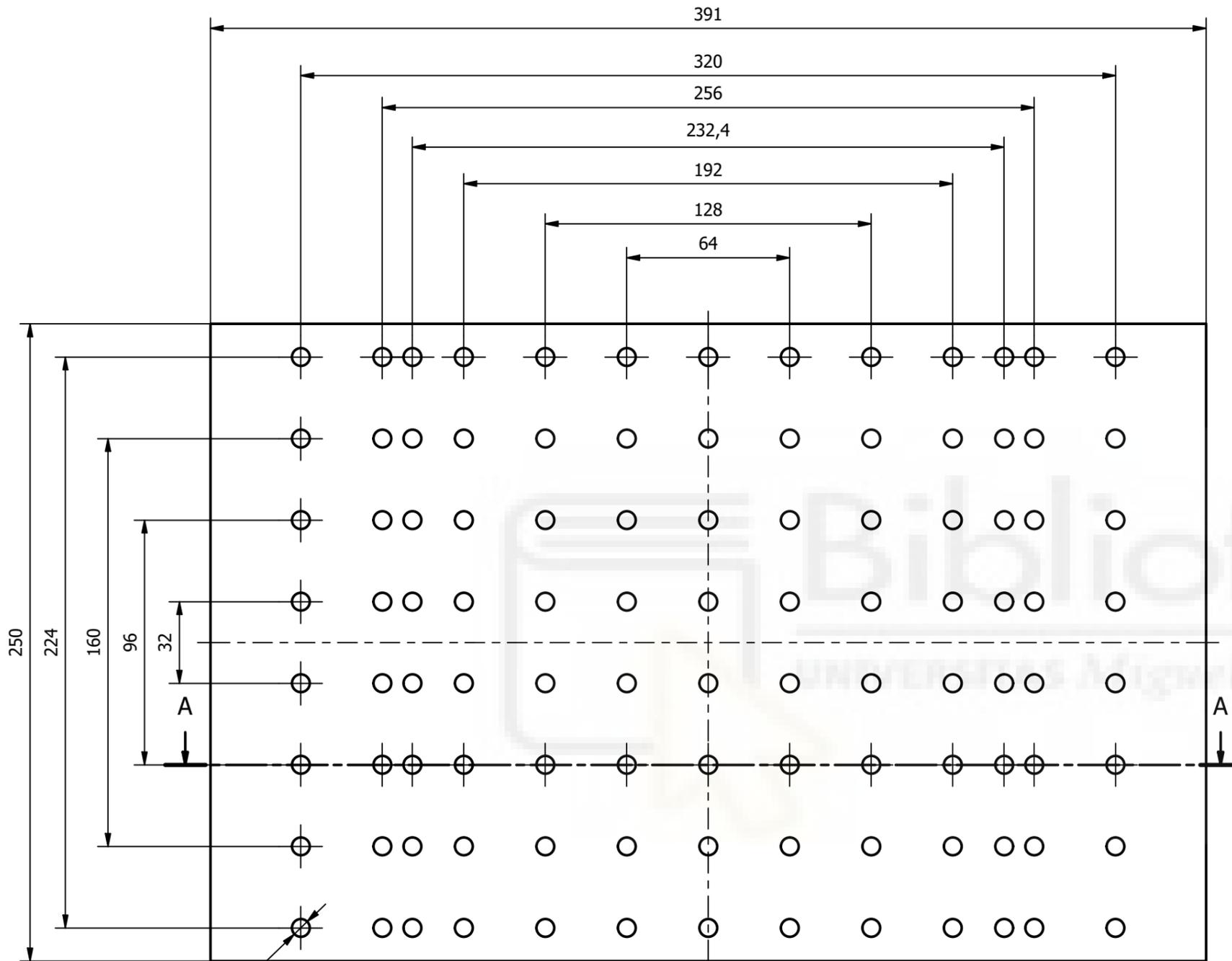


FECHA CREACIÓN: 08/01/2020	TÍTULO DEL PROYECTO: Útil de montaje de probetas		
EMPRESA Y LOGO COMERCIAL: Universidad Miguel Hernández	DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA: P01-Base ; Material: Aluminio 6061 (Masa=3,829 kg)		
 UNIVERSITAT Miguel Hernández	AUTOR: Andrés Robles Navarro	ESCALA 1 : 2	Tamaño hoja A3
			Nº de hoja 1

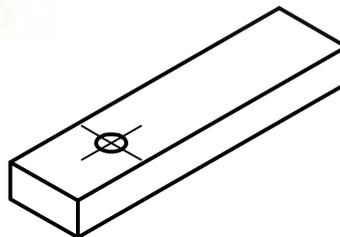
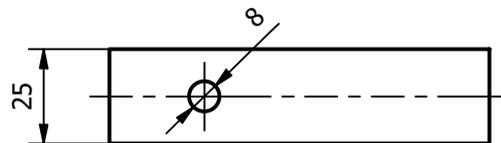
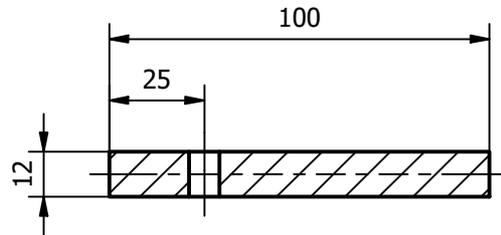


Fabricar 2 unidades de esta pieza.

FECHA CREACIÓN: 08/01/2020	TÍTULO DEL PROYECTO: Útil de montaje de probetas			
EMPRESA Y LOGO COMERCIAL: Universidad Miguel Hernández 	DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA: P02-Pletina lateral ; Material: Aluminio 6061 (Masa=0,259 kg)			
AUTOR: Andrés Robles Navarro		ESCALA 1 : 2	Tamaño hoja A4	Nº de hoja 1

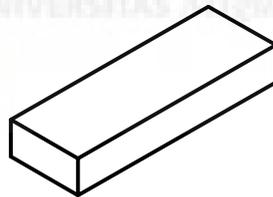
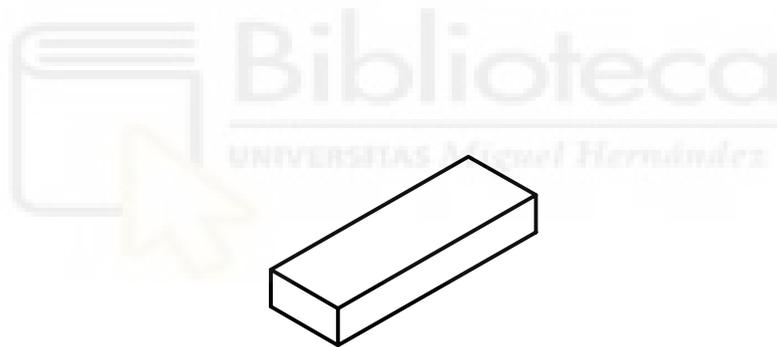
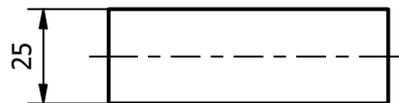
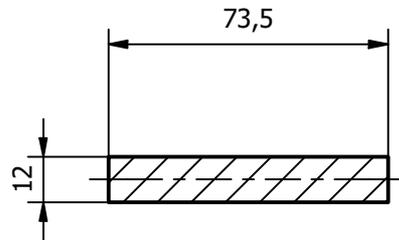


FECHA CREACIÓN: 08/01/2020	TÍTULO DEL PROYECTO: Útil de montaje de probetas		
EMPRESA Y LOGO COMERCIAL: Universidad Miguel Hernández	DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA: P03-Tapa ; Material: Aluminio 6061 (Masa=3,797 kg)		
	AUTOR: Andrés Robles Navarro	ESCALA 1 : 2	Tamaño hoja A3
			Nº de hoja 1



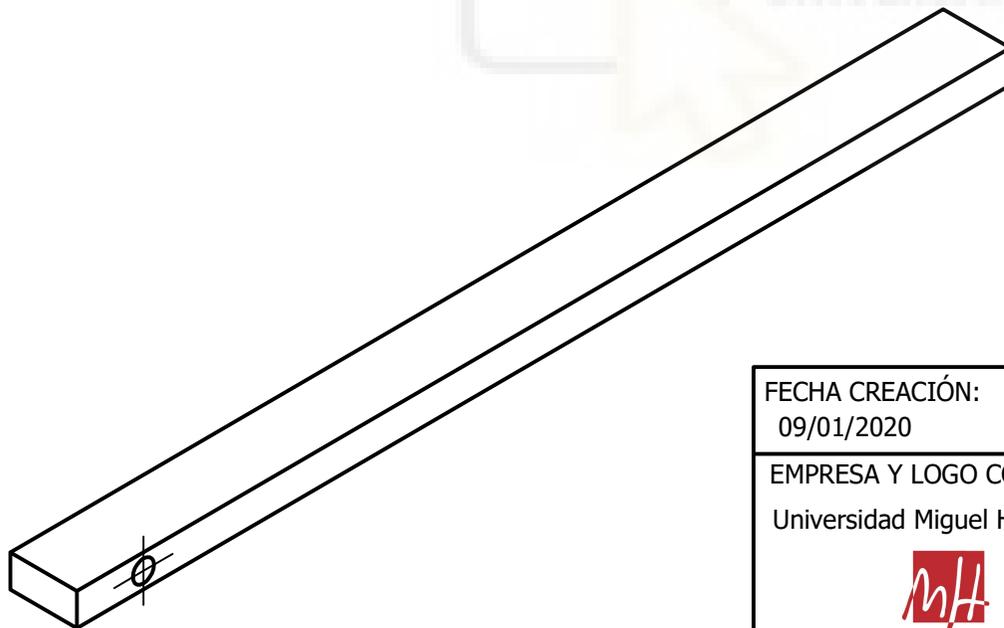
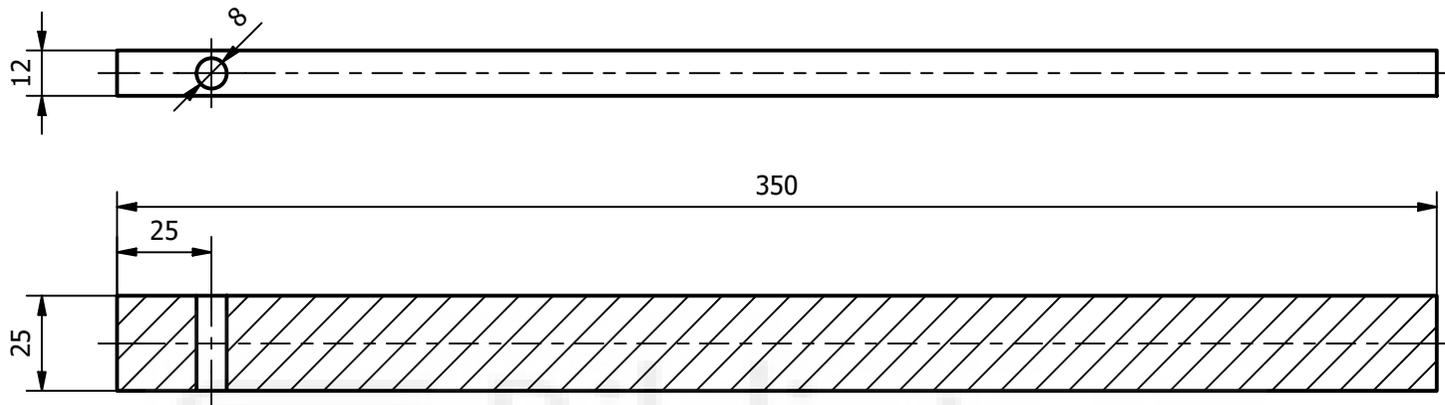
Fabricar 16 unidades de esta pieza.

FECHA CREACIÓN: 09/01/2020	TÍTULO DEL PROYECTO: Útil de montaje de probetas			
EMPRESA Y LOGO COMERCIAL: Universidad Miguel Hernández 	DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA: P04-Parte inf y sup probeta SLJ Material: Acero, aleación (Masa=0,227 kg)			
AUTOR: Andrés Robles Navarro		ESCALA 1 : 2	Tamaño hoja A4	Nº de hoja 1



Fabricar 16 unidades de esta pieza.

FECHA CREACIÓN: 09/01/2020	TÍTULO DEL PROYECTO: Útil de montaje de probetas			
EMPRESA Y LOGO COMERCIAL: Universidad Miguel Hernández 	DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA: P012-Separador 1 probeta SLJ Material: Acero, aleación (Masa=0,170 kg)			
AUTOR: Andrés Robles Navarro		ESCALA 1 : 2	Tamaño hoja A4	Nº de hoja 1



Fabricar 16 unidades de esta pieza.

FECHA CREACIÓN: 09/01/2020	TITULO DEL PROYECTO: Útil de montaje de probetas		
EMPRESA Y LOGO COMERCIAL: Universidad Miguel Hernández	DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA: P07-Parte inf y sup probeta DCB Material: Acero, aleación (Masa=0,802 kg)		
	AUTOR: Andrés Robles Navarro		ESCALA 1 : 2
			Tamaño hoja A4
			Nº de hoja 1

6. BIBLIOGRAFÍA

6.1 DOCUMENTOS BIBLIOGRÁFICOS

- Amstutz, C., Bürgi, M., & Jousset, P. (2018). Characterisation and FE simulation of polyurethane elastic bonded joints under multiaxial loading conditions. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 83, 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.02.029>
- Aranda-Iglesias, D., Vadillo, G., Rodríguez-Martínez, J. A., & Volokh, K. Y. (2017). Modeling deformation and failure of elastomers at high strain rates. *Mechanics of Materials*, 104, 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.10.004>
- Bergström, J. S. (s.f). Constitutive Modeling of Elastomers – Accuracy of Predictions and Numerical Efficiency. *PolimerFEM*. https://polymerfem.com/polymer_files/Elastomer_Modeling_Comparison.pdf (ELASTOMER_MODELING)
- Bermejo López, R., & Oroño López, J. (2016, enero). http://oa.upm.es/39415/1/RAQUEL_BERMEJO_LOPEZ.pdf (Tesis doctoral). http://oa.upm.es/39415/1/RAQUEL_BERMEJO_LOPEZ.pdf
- Blackman, B., Dear, J. P., Kinloch, A. J., & Osiyemi, S. (1991). The calculation of adhesive fracture energies from double-cantilever beam test specimens. *Journal of Materials Science Letters*, 10(5), 253-256. <https://doi.org/10.1007/bf00735649>
- Blackman, B. R. K., Kinloch, A. J., Paraschi, M., & Teo, W. S. (2003). Measuring the mode I adhesive fracture energy, GIC, of structural adhesive joints: the results of an international round-robin. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23(4), 293-305. [https://doi.org/10.1016/s0143-7496\(03\)00047-2](https://doi.org/10.1016/s0143-7496(03)00047-2)
- Bonet, J., Wood, R. D., & Richard D Wood, M. A. T. H. É. M. A. T. I. C. I. E. N. (1997). *Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis*. Cambridge University Press.
- Brown, R. (2002). *Handbook of Polymer Testing*. Rapra Technology.
- Burchardt, B, Sika Services AG, Switzerland. (2010). *Advances in polyurethane structural adhesives*. Woodhead Publishing Limited.
- Cabello, M., Zurbitu, J., Renart, J., Turon, A., & Martínez, F. (2016). A non-linear hyperelastic foundation beam theory model for double cantilever beam tests with thick flexible adhesive. *International Journal of Solids and Structures*, 80, 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.10.017>

- Cabello Ulloa, M. J. (2016). DESARROLLO DE MODELOS PARA EL CÁLCULO DE UNIONES ESTRUCTURALES CON ADHESIVOS FLEXIBLES (Tesis Doctoral). <http://hdl.handle.net/10803/403837> (Tmcu)
- Calabuig, J. M., & García, L. M. (2017b). Modelling in Science Education and Learning (1.a ed., Vol. 10). Universidad Politécnica de Valencia. <https://polipapers.upv.es/index.php/MSEL/685>
- Campilho, R. D. S. G. (2017). Strength Prediction of Adhesively-Bonded Joints. Amsterdam University Press.
- Canseco de la Cruz, R. A., Camarillo Gómez, K. A., Silva Moreno, A., & Lesso Arroyo, R. (2011). Experimentación y Análisis por MEF del Comportamiento Hiperelástico en Materiales usados en Calzado Deportivo. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, INGENIERÍA MECÁNICA TECNOLÓGICA Y DESARROLLO, 4. https://cielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-73812011000100004
- Carleo, F. (2016, 7 diciembre). Viscoelastic constitutive models for high load suspension [Diapositivas]. IOM3. <http://www.iom3.org/sites/default/files/event-documents/08%20QMUL.pdf>
- Carvalho, U. T. F., & Campilho, R. D. S. G. (2016). Application of the direct method for cohesive law estimation applied to the strength prediction of double-lap joints. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 85, 140-148. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.08.018>
- Castillo-Méndez, J. C., & Ortiz-Prado, A. (2019). Simulación numérica de materiales hiperelásticos isotrópicos incompresibles usando una subrutina de material definida por el usuario. MEMORIAS DEL XXV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM. http://somim.org.mx/memorias/memorias2019/articulos/A3_94.pdf
- Charlton, D. J., Yang, J., & Teh, K. K. (1993). A REVIEW OF METHODS TO CHARACTERIZE RUBBER ELASTIC BEHAVIOR FOR USE IN FINITE ELEMENT ANALYSIS. Dept, of Mechanical Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Western Australia, 67, 481-502.
- Chaves, F. J. P., da Silva, L. F. M., de Moura, M. F. S. F., & Dillard, D. (2012, 28 febrero). FRACTURE TOUGHNESS AS A FUNCTION OF THE MODE MIXITY USING NON-CONVENTIONAL TECHNIQUES [Diapositivas]. Filipechaves. http://www.filipechaves.com/DOCs/AS_2012_presentation_filipe.pdf

- Chaves, F. J. P., da Silva, L. F. M., de Moura, M. F. S. F., Dillard, D. A., & Esteves, V. H. C. (2014). Fracture Mechanics Tests in Adhesively Bonded Joints: A Literature Review. *The Journal of Adhesion*, 90(12), 955-992. <https://doi.org/10.1080/00218464.2013.859075>
- Chiminelli, A. , Valero C., Lizaranzu M., López C. I. & Canales M. (2019): Modelling of bonded joints with flexible adhesives, *The Journal of Adhesion*, DOI: 10.1080/00218464.2018.1562347
- Crocker, L. E., National Physical Laboratory (Great Britain), & National Physical Laboratory (Great Britain). (1999). *Hyperelastic Modelling of Flexible Adhesives (Vol. 4)*. NPL.
- De Moura, M., Campilho, R., & Goncalves, J. (2008). Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. *Composites Science and Technology*, 68(10-11), 2224-2230. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.04.003>
- De Moura, M. F. S. F., & de Morais, A. B. (2008). Equivalent crack based analyses of ENF and ELS tests. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(9), 2584-2596. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.03.005>
- De Moura, M. F. S. F., Gonçalves, J. P. M., Chousal, J. A. G., & Campilho, R. D. S. G. (2008). Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28(8), 419-426. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.04.004>
- Dean, G., & Crocker, L. (2001). *The Use of Finite Element Methods for Design with Adhesives. (Vol. 48)*. Materials Centre.
- Dias, V., Odenbreit, C., Hechler, O., Scholzen, F., & Ben Zineb, T. (2014). Development of a constitutive hyperelastic material law for numerical simulations of adhesive steel–glass connections using structural silicone. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 48, 194-209. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.09.043>
- Dispersyn, J., Hertelé, S., Waele, W. D., & Belis, J. (2017). Assessment of hyperelastic material models for the application of adhesive point-fixings between glass and metal. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 77, 102-117. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.03.017>

- Doman, D. A., Cronin, D. S., & Salisbury, C. P. (2006). Characterization of Polyurethane Rubber at High Deformation Rates. *Experimental Mechanics*, 46(3), 367-376. <https://doi.org/10.1007/s11340-006-6422-8>
- Dragoni, E., & Medri, G. (1988). Fracture toughness evaluation of natural rubber. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 10(1), 79-83. [https://doi.org/10.1016/0167-8442\(88\)90059-6](https://doi.org/10.1016/0167-8442(88)90059-6)
- Duncan, B., & Crocker, L. (2001). *Characterisation of Flexible Adhesives for Design (Vol. 45)*. Materials Centre.
- Duncan, B., & Dean, G. (2003). Measurements and models for design with modern adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23(2), 141-149. [https://doi.org/10.1016/s0143-7496\(03\)00006-x](https://doi.org/10.1016/s0143-7496(03)00006-x)
- Echchur Rangarajan, S., & Ramarathnam, K. K. (2020). Damage evolution in natural rubber: An experimental study. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 137, 103850. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2019.103850>
- Elena Orgilés - INESCOP, Oscar Calvo – AITEX, & Rosa Ma Pérez - AIDIMME. (2016, junio). E3.1.b INFORME SOBRE MATERIALES Y MÉTODOS DE UNIÓN .FUNTEXCAL II. <https://www.inescop.es/images/Proyectos/Regionales/2016/FUNTEXCAL-II/E3.1b%20FUNTEXCAL.pdf>
- Elmukashfi, E., & Kroon, M. (2013). Numerical analysis of dynamic crack propagation in biaxially strained rubber sheets. *Engineering Fracture Mechanics*, 124-125, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.04.025>
- Faye, A., Lev, Y., & Volokh, K. Y. (2019). The effect of local inertia around the crack-tip in dynamic fracture of soft materials. *Mechanics of Soft Materials*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s42558-019-0004-2>
- Franus, A., & Kowalewski, Ł. (2018). An efficiency comparison of numerical implementation approaches of hyperelastic constitutive model in ABAQUS/Standard. *MATEC Web of Conferences*, 196, 01052. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819601052>
- García Garino, C. G., Mirasso, A. E., Storti, M. A., & Tornello, M. E. (2013). MODELADO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA INTERFASE EN MATERIALES COMPUESTOS. *Mecánica Computacional*, 32, 1653-1670. <http://www.amcaonline.org.ar>

- García Ledesma, R., & Oroño, J. (2013). Diseño y comportamiento de uniones estructurales mecánicas y adhesivas. Condiciones superficiales y operacionales (Tesis doctoral). Escuela técnica superior de ingenieros de Madrid. http://oa.upm.es/22235/1/RICARDO_GARCIA_LEDESMA.pdf.
- Gent, A. N. (1996). Adhesion and Strength of Viscoelastic Solids. Is There a Relationship between Adhesion and Bulk Properties?†. *Langmuir*, 12(19), 4492-4496. <https://doi.org/10.1021/la950887q>
- Gent, A. N., & Kim, H. J. (1978). Tear Strength of Stretched Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 51(1), 35-44. <https://doi.org/10.5254/1.3535725>
- González Carbonell, R. A., Álvarez García, E., Moya Rodríguez, J. L., & Abreu González, K. (2009). Modelos de materiales hiperelásticos para el análisis de los elastómeros usando el MEF. *Ingeniería Mecánica*, 12(3), 57-66.
- Guo, H., Li, F., Wen, S., Yang, H., & Zhang, L. (2019). Characterization and Quantitative Analysis of Crack Precursor Size for Rubber Composites. *Materials*, 12(20), 3442. <https://doi.org/10.3390/ma12203442>
- Hackett, R. M. (2018). *Hyperelasticity Primer*. Springer Publishing.
- Hasegawa, K., Crocombe, A. D., Coppuck, F., Jewell, D., & Maher, S. (2015). Characterising bonded joints with a thick and flexible adhesive layer. Part 2: Modelling and prediction of structural joint responses. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 63, 158-165. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.09.004>
- Hasegawa, K., Crocombe, A. D., Coppuck, F., Jewel, D., & Maher, S. (2015). Characterising bonded joints with a thick and flexible adhesive layer—Part 1: Fracture testing and behaviour. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 63, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.09.003>
- Hocine, N. A., Abdelaziz, M. N., & Imad, A. (2002). Fracture problems of rubbers: J-integral estimation based upon η factors and an investigation on the strain energy density distribution as a local criterion. *International Journal of Fracture*, 117(1), 1-23. <https://doi.org/10.1023/a:1020967429222>
- Hocine, N. A., Abdelaziz, M. N., & Mesmacque, G. (1998). Experimental and numerical investigation on single specimen methods of determination of J in rubber materials. *International Journal of Fracture*, 94(4), 321-338. <https://doi.org/10.1023/a:1007520003294>

- Hui, C.-Y., A., J., Bennison, S. J., & Londono, J. D. (2003). Crack blunting and the strength of soft elastic solids. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 459(2034), 1489-1516. <https://doi.org/10.1098/rspa.2002.1057>
- Joe, C. R., & Kim, B. H. (1990). A method to determine the R-curve of flexible materials using a monotonic loading of a single trouser tear specimen. *International Journal of Fracture*, 44(1), 15-26. <https://doi.org/10.1007/bf00012549>
- Kim, B., Lee, S. B., Lee, J., Cho, S., Park, H., Yeom, S., & Park, S. H. (2012). A comparison among Neo-Hookean model, Mooney-Rivlin model, and Ogden model for chloroprene rubber. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(5), 759-764. <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0099-y>
- Kregting, R. (2005, febrero). Cohesive zone models towards a robust implementation of irreversible behaviour. s.n.
- Kuhn, C., & Müller, R. (2010). A continuum phase field model for fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(18), 3625-3634. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.08.009>
- Kundu, T. (2008). *Fundamentals of Fracture Mechanics*. Taylor & Francis.
- Lake, G. J., & Thomas, G. (1967). The strength of highly elastic materials. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 300(1460), 108-119. <https://doi.org/10.1098/rspa.1967.0160>
- Laserna Montoya, J. A. (2017). DELAMINACIÓN DE UN COMPUESTO DE FIBRA DE VIDRIO SOMETIDO A CARGAS CUASIESTÁTICAS Y A FATIGA POR IMPACTO EN MODO I DE CARGA (Proyecto de Grado). <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/13929/u754139.pdf?sequence=1>
- Loew, P. J., Peters, B., & Beex, L. A. A. (2019b). Rate-dependent phase-field damage modeling of rubber and its experimental parameter identification. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 127, 266-294. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2019.03.022>
- Lubowiecka, I., Rodríguez, M., Rodríguez, E., & Martínez, D. (2012). Experimentation, material modelling and simulation of bonded joints with a flexible adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 37, 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.01.010>

- Lucas da Silva, F. M., Paulo des Naves, J. C., Adams, R. D., & Spelt, J. K. (2009). Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. <https://www.elsevier.com/locate/ijadhadh>
- Lucas da Silva, F. M., Paulo des Naves, J. C., Adams, R. D., & Spelt, J. K. (2009). Analytical models of adhesively bonded joints—Part II: Comparative study. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. <https://www.elsevier.com/locate/ijadhadh>
- Marckmann, G., & Verron, E. (2006). Comparison of hyperelastic models for rubber-like materials. *Rubber Chemistry and Technology*, American Chemical Society, 79(5), 835-858. <https://doi.org/10.5254/1.3547969>
- Masoliver i Marcos, G., Pérez-Sánchez, M., & López-Jiménez, P. A. (2017). Modelo experimental para estimar la viscosidad de fluidos no newtonianos: ajuste a expresiones matemáticas convencionales. *Modelling in Science Education and Learning*, 10(1), 5-x. <https://doi.org/10.4995/msel.2017.5901> X 685
- Miehe, C., Hofacker, M., & Welschinger, F. (2010). A phase field model for rate-independent crack propagation: Robust algorithmic implementation based on operator splits. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 199(45-48), 2765-2778. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2010.04.011>
- Moreira, D. C., & Nunes, L. C. S. (2013). Comparison of simple and pure shear for an incompressible isotropic hyperelastic material under large deformation. *Polymer Testing*, 32(2), 240-248. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.11.005> X
- Niu, R.-M., Zhou, Q.-C., Chen, X., Ju, Y.-T., Wei, Z., & Zheng, J. (2014). Experimental and numerical analysis of mode II fracture between propellant and insulation. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 52, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.03.005>
- Nunes, L. C. S. (2011). Mechanical characterization of hyperelastic polydimethylsiloxane by simple shear test. *Materials Science and Engineering: A*, 528(3), 1799-1804. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.025>
- Ocaña López, R. (2017). DEGRADACIÓN AMBIENTAL Y EN CONDICIONES ADVERSAS DE ADHESIVOS ESTRUCTURALES (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. http://oa.upm.es/47141/1/ROSA_CONCEPCION_OCANA_LOPEZ.pdf

- Ogden, R. W., & Roxburgh, D. G. (1999). A pseudo-elastic model for the Mullins effect in filled rubber. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 455(1988), 2861-2877. <https://doi.org/10.1098/rspa.1999.0431>
- Peng, S. H., Shimbori, T., & Naderi, A. (1994). Measurement of Elastomer's Bulk Modulus by Means of a Confined Compression Test. *Rubber Chemistry and Technology*, 67(5), 871-879. <https://doi.org/10.5254/1.3538718>
- Pérez-Galmés, M., Renart, J., Sarrado, C., Rodríguez-Bellido, A., & Costa, J. (2016). A data reduction method based on the J -integral to obtain the interlaminar fracture toughness in a mode II end-loaded split (ELS) test. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 90, 670-677. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.08.020>
- Persson, B. N. J., Albohr, O., Heinrich, G., & Ueba, H. (2005). Crack propagation in rubber-like materials. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 17(44), R1071-R1142. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/17/44/r01>
- Pidaparti, R. M. V., Yang, T. Y., & Soedel, W. (1989). A plane stress finite element method for the prediction of rubber fracture. *International Journal of Fracture*, 39(4), 255-268. <https://doi.org/10.1007/bf00017700>
- Pilipović, A., Šercer, M., & Kodvanj, J. (2010). Influence of crosslinking parameters on mechanical properties of chloroprene rubber. *Transactions of FAMENA*, 34(3), 57-70. https://www.researchgate.net/publication/298579560_Influence_of_crosslinking_parameters_on_mechanical_properties_of_chloroprene_rubber#read
- Roque, M. R. (s.f). THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALISYS OF ELASTOMERS. Técnico Lisboa. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/homepage/ist12623>
- Russ, J., Slesarenko, V., Rudykh, S., & Waisman, H. (2020). Rupture of 3D-printed hyperelastic composites: experiments and phase field fracture modeling. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.103941>
- SÁNCHEZ MATRÁN, F. (2010, febrero). UNIONES ADHESIVAS Y SUS APLICACIONES NAVALES. (TFG). <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/1815/pfc3384.pdf;jsessionid=825D98DE89E0873B057078289EC8D4B4?sequence=1>

- Sasso, M., Palmieri, G., Chiappini, G., & Amodio, D. (2008). Characterization of hyperelastic rubber-like materials by biaxial and uniaxial stretching tests based on optical methods. *Polymer Testing*, 27(8), 995-1004. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.09.001>
- Schieppati, J., Schritteser, B., Wondracek, A., Robin, S., Holzner, A., & Pinter, G. (2018). Impact of temperature on the fatigue and crack growth behavior of rubbers. *Procedia Structural Integrity*, 13, 642-647. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.106>
- Sekiguchi, Y., Katano, M., & Sato, C. (2015). Experimental study of the Mode I adhesive fracture energy in DCB specimens bonded with a polyurethane adhesive. *The Journal of Adhesion*, 93(3), 235-255. <https://doi.org/10.1080/00218464.2015.1070101>
- Staudt, Y., Odenbreit, C., & Schneider, J. (2018). Failure behaviour of silicone adhesive in bonded connections with simple geometry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 82, 126-138. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.12.015>
- Thomas, A. G. (1994). The Development of Fracture Mechanics for Elastomers. *Rubber Chemistry and Technology*, 67(3), 50-67. <https://doi.org/10.5254/1.3538688>
- Turon, A., Dávila, C. G., Camanho, P. P., & Costa, J. (2007). An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models. *Engineering Fracture Mechanics*, 74(10), 1665-1682. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.08.025>
- Tvergaard, V., & Hutchinson, J. W. (1996). On the toughness of ductile adhesive joints. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 44(5), 789-800. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(96\)00011-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(96)00011-7)
- Volokh, K. (2007). Hyperelasticity with softening for modeling materials failure. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55(10), 2237-2264. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2007.02.012>
- Volokh, K., & Trapper, P. (2008). Softening hyperviscoelasticity for modeling rate-dependent material failure. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 3(9), 1695-1707. <https://doi.org/10.2140/jomms.2008.3.1695>
- Volokh, K. (2010). On modeling failure of rubber-like materials. *Mechanics Research Communications*, 37(8), 684-689. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2010.10.006>

- Volokh, K. (2013). REVIEW OF THE ENERGY LIMITERS APPROACH TO MODELING FAILURE OF RUBBER. *Rubber Chemistry and Technology*, 86(3), 470-487. <https://doi.org/10.5254/rct.13.87948>
- Volokh, K. (2017). Loss of ellipticity in elasticity with energy limiters. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 63, 36-42. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.10.003>
- Wang, J., & Zhang, C. (2009). Three-parameter, elastic foundation model for analysis of adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(5), 495-502. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.10.002>
- Wang, X., Mieth, U., & Cappelletti, A. M. (2004). Numerical methods for design of bonded joints for ship structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 218(4), 247-258. <https://doi.org/10.1177/147509020421800404>
- Ye, J.-Y., Zhang, L.-W., & Reddy, J. N. (2020). Large strained fracture of nearly incompressible hyperelastic materials: Enhanced assumed strain methods and energy decomposition. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 139, 103939. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.103939>
- Yeoh, O. H., & Fleming, P. D. (1997). *A New Attempt to Reconcile the Statistical and Phenomenological Theories of Rubber Elasticity*. GenCorp, Corporate Technology Center, Akron, Ohio, 1919-1929.
- Yin, L., Luo, Z., Zhong, J., Yang, B., & Ji, Y. (2020). Behaviour and mechanism of fatigue crack growth in aramid-fibre-reinforced styrene-butadiene rubber composites. *International Journal of Fatigue*, 134, 105502. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105502>
- Zhou, Q.-C., Ju, Y.-T., Wei, Z., Han, B., & Zhou, C.-S. (2013). Cohesive Zone Modeling of Propellant and Insulation Interface Debonding. *The Journal of Adhesion*, 90(3), 230-251. <https://doi.org/10.1080/00218464.2013.790773>
- Zúñiga, A. E., & Rosales Torres, C. (2006). Caracterización del ablandamiento de los elastómeros cuando son sometidos a esfuerzos biaxiales. *INGENIERÍA MECÁNICA TECNOLOGÍA Y DESARROLLO*, 2(3), 78-84. https://www.researchgate.net/publication/228659866_Caracterizacion_del_ablandamiento_de_los_elastomeros_cuando_son_sometidos_a_esfuerzos_biaxiales

6.2 OTROS DOCUMENTOS

1. 2. Adhesivos. (s. f). En *Introducción Adhesivos* (pp. 17-39). <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/46/Introduccion2.pdf;jsessionid=D7F31575A9EA248A8A14D8955F2126A7?sequence=18>
2. Adhesivos de curado físico. (s.f). *losadhesivos.com*. <https://www.losadhesivos.com/adhesivos-curado-fisico.html>
3. Arana, J. L., & González, J. J. (s. f.). *Mecánica de Fractura*. Editorial de la Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitateko Argitalpen Zerbitzua. <https://web-argitalpena.adm.ehu.es/pdf/UCWEB024559.pdf>
4. ASTM D412: LA GUÍA DEFINITIVA PARA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE TRACCIÓN DE ELASTÓMEROS. (s. f.). INSTRON. <https://www.instron.es/es/testing-solutions/by-standard/astm/multiple-testing-solutions/astm-d412>
5. Bonding: unión por pegado entre casco y refuerzos. (2016, 18 septiembre). WordPress.com. <https://proyectosnavales.com/2016/09/18/bonding-union-por-pegado-entre-casco-y-refuerzos/>
6. BRITISH STANDARD. (1999). BS 2782-3: Methods 340A and 340B: 1978.
7. Calzado y Marroquinería. (2018, 4 abril). Adhesivos Gimpex. <https://www.adhesivosgimpex.com/productos/calzado-y-marroquineria/>
8. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN. (s. f.). En *ESTUDIO DEL FALLO EN UNIONES ADHESIVAS CON MATERIALES COMPUESTOS* (pp. 1-6). <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60156/fichero/VOLUMEN+1%252FCap%C3%ADtulo1.pdf>
9. Capítulo 4. Ley de Comportamiento. (s. f.). En *Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras* (p. 4.1-4.37). http://www.eis.uva.es/reic/Elas_Web/teoria/ELAS4_breve.pdf.
10. Celda de Carga. (s. f.). <http://www.citeenergia.com.pe/>
<http://www.citeenergia.com.pe/wp-content/uploads/2016/09/celda-de-carga.pdf>
11. Cintas Adhesivas para Empaque: Preguntas y Respuestas. (s. f.). <http://www.packsys.com/>. <http://www.packsys.com/blog/cintas-adhesivas-preguntas-y-respuestas/>
12. Clasificación y tipos de adhesivos industriales. (2017, 7 mayo). Antala Speciality Chemical. <https://www.antala.es/clasificacion-adhesivos-industriales/>

13. *¿Cómo aplicar un adhesivo estructural?* (2018, 19 julio). *www.reparacion-vehiculos.es*. <https://blog.reparacion-vehiculos.es/como-aplicar-adhesivo-estructural>
14. *Cppling adhesivo de caucho para calzado, reparaci3n de calzado*. (s. f.). 123RF. https://es.123rf.com/photo_39810186_cppling-adhesivo-de-caucho-para-calzado-reparaci%C3%B3n-de-calzado.html
15. *DISEÑO Y MANUFACTURA DIGITAL DMD*. (2019, 10 abril). *Desafíos en simulación con materiales hiperelásticos* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=EuygBHLevb0&feature=youtu.be>
16. *Fig 5- uploaded by Dolores Riera*. (2004). https://www.researchgate.net/https://www.researchgate.net/figure/Resultado-de-un-ciclo-de-carga-descarga-en-traccion-obtenido-para-el-elastomero-en_fig1_277256017
17. *Historia de los pegamentos*. (2011). <https://es.calameo.com/read/000919112d780de2b84c3>
18. *ISO 37:2017(en) Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties*. (s. f.). <https://www.iso.org/https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:37:ed-6:v1:en>
19. *JET-CHEMICAL PRODUCTS INC*. (s. f.). *ADHESIVOS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ | JET-CHEM*. <http://jet-chem.com/CHEMICAL/adhesivos-en-la-industria-automotriz/>
20. *Jowat adhesivos*. (s. f). *Soluciones adhesivas para la industria textil* [Diapositivas]. [jowat.com. https://www.jowat.com/fileadmin/dokumente/anwendungen/PDFs_BI/BI_Textilindustrie_ES-s.pdf](https://www.jowat.com/fileadmin/dokumente/anwendungen/PDFs_BI/BI_Textilindustrie_ES-s.pdf)
21. *La fabricación de adhesivo de contacto con el pegamento de alta viscosidad 4L&18L zapatos*. (s. f.). *Made-in-China.com*. https://es.made-in-china.com/co_bolichemical/product_Manufacture-Contact-Adhesive-Glue-with-Hight-Viscosity-4L-18L-Shoes_rhuooyegg.html
22. *Madrid, M., & Loctite España*. (s. f). *TECNOLOGÍA DE LA ADHESIÓN*. https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso_de_adhesivos.pdf
23. *Mecapedia-Coeficiente de Poisson*. (s. f.). *Mecapedia*. http://www.mecapedia.uji.es/coeficiente_de_Poisson.htm

24. *MÉTODO DE ENSAYO NOTA TÉCNICA HULE.* (s. f.). MTS.
https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_4016224.pdf
25. *Mullins efecto.* ABAQUS-DOC. Recuperado de: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAETHERefMap/simathe-c-mullinseffect.htm>
26. *PLASTICOS.* (s. f.). iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com.
<https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2009/03/plasticos1.pdf>
27. *Susca, A. (s.f). Introducción a la teoría básica de la mecánica del sólido. (Tesis Magister).*
<http://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/123456789/2003/1/Capitulo%201.pdf> PAG6
28. *Unidad 15. Materiales Poliméricos y Compuestos.* (s. f.).
https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_4.html.
29. *TEMA 3. VISCOELASTICIDAD.* (s. f.). En s.n (pp. 1-31).
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3624/1/tema3RUA.pdf>

