



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA TEXTIL

**"ANÁLISIS REOLÓGICO EN DIFERENTES
TIPOS DE HILOS TEXTILES PARA
ESTUDIAR SU COMPORTAMIENTO
MECÁNICO"**

T E S I S
QUE PARA OPTAR AL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA TEXTIL

P R E S E N T A:
ING. TERESA RAMÍREZ RODRIGUEZ



MEXICO

2005



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la ciudad de México siendo las 17:00 horas del día 31 del mes de marzo Del 2004 Se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Postgrado e Investigación de: ESIT

Para examinar la tesis de grado titulada:

Análisis Reológico en Diferentes Tipos de Hilos Textiles para Estudiar su Comportamiento Mecánico

Presentada por el alumno:

<u>Ramírez</u>	<u>Rodríguez</u>	<u>Teresa</u>
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre

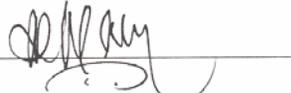
Con registro: **A 0 2 0 2 9 7**

Aspirante al grado de: **Maestría En Ciencias en Ingeniería Textil**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISADORA

Director de tesis

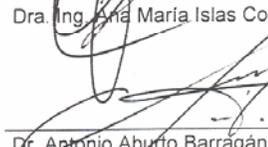

 Dr. Ing. Arún Naik Kardile


 Dr. Ing. Gabriel Guillén Buendía
 (Co-Director)

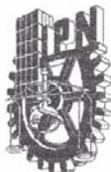

 Dra. Ing. Ana María Islas Cortés


 M en C, Norberto Galicia Aguilar

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


 Dr. Antonio Aburto Barragán


 Dra. Ing. Ana María Islas Cortés



CGPI-61

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

CARTA DE CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D. F. el día 31 del mes marzo del año 2004, el (la) que suscribe Ing. Teresa Ramírez Rodríguez alumno(a) del Programa Maestría en Ciencias en Ingeniería Textil con número de registro A020297, adscrito a la SEPI-ESIT, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Arún Naik Kardile /Dr. Gabriel Guillen Buendía y cede los derechos del trabajo intitulado "Análisis Reológico en Diferentes Tipos de Hilos Textiles para Estudiar su comportamiento Mecánico" al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección

teresa_7r@yahoo.com.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Teresa Ramírez Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis se deriva del proyecto CGPI 20050521 agradeciendo el apoyo al Dr. Luis Humberto Fabila Castillo Coordinador General de Posgrado e investigación, al M. en C. Eduardo Meza Olvera Coordinador General de Vinculación.

A quienes hicieron posible la conclusión de éste trabajo de tesis y me motivaron con su actitud a continuar adelante.

El incremento de la sabiduría

Puede medirse exactamente

Por la disminución de bilis

F. Nietzsche

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos

Al apoyo incondicional de mi madre, por estar siempre dispuesta cuando más lo necesito y por creer en mi.

La libertad es el poder para llevar a cabo
lo que deseamos y necesitamos para alcanzar una vida mejor,
y para conseguir la libertad es necesario la razón,
pero no la razón en vacío, sino,
la razón acompañada de la valentía que le dan las convicciones,
la razón que no solamente sabe que las cosa son y deben ser,
sino lo que con una emoción que le impulsa a obrar

F. Nietzsche

GLOSARIO

Alargamiento relativo (a, A).- Es la expresión unitaria (a) o porcentual (A) del alargamiento experimentado por la probeta a consecuencia de una carga, con referencia a su longitud original.

Análisis de regresión.- Es un conjunto de técnicas; gráficas o analíticas para tratar de encontrar la relación entre una variable respuesta $f(\alpha)$, y una serie de variables independientes $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_k$; llamadas variables regresoras.

Carga (F).- Es una fuerza de tracción que se aplica a la probeta en su dirección axial. Se expresa en centiNewtons (cN) o en gramos-fuerza (gf). La equivalencia entre ambas magnitudes es de $1 \text{ cN} = 1.02 \text{ gf}$.

Carga específica (f).- Es la carga soportada por unidad de masa lineal (tex) de la probeta en su estado inicial, se puede designar como tensión. Se expresa en centiNewton sobre tex (cN/tex).

Carga de rotura (R).- Es la carga máxima aplicada para romper la probeta en ensayo de carga creciente. Comúnmente se le designa como resistencia a la tracción. Se expresa en centiNewton (cN).

Coefficiente de determinación.- Es una medida del grado de ajuste de la recta de regresión a la nube de puntos.

Curva carga-alargamiento (f/A).- Se toma como tal la que relaciona el fenómeno de carga específica (f) aplicada a la probeta (en CN/tex) con el respectivo alargamiento relativo porcentual (A), expresando en ordenadas la carga específica y en abscisas el alargamiento. Para su construcción se tomarán como puntos de referencia los de la carga específica media correspondiente a los alargamientos de 2.5, 5.0, 10, 20%, etc., mientras todas las probetas de la muestra los superen, interrumpiéndose la curva a partir del alargamiento correspondiente a la primera rotura. Sin embargo, un punto singular señalará la posición de tenacidad media (θ) con su respectivo alargamiento de rotura (A_r). Otra forma más precisa de representación de este fenómeno considerando los errores de muestreo es la de indicar los correspondientes límites de confianza de todos los alargamientos observados, aunque no todas las probetas de la muestra rompen en ellos, y unir estos nuevos puntos para limitar toda la zona de confianza de la curva anteriormente trazada.

Elemento de Hooke (muelle).- Constituye la componente elástica y esta representada por un resorte, su comportamiento se relaciona con la respuesta instantánea al esfuerzo recibido por la variación de las dimensiones que serán recobradas al cesar el esfuerzo.

Elemento de Newton (émbolo).- Explica la variación de dimensiones sin recuperación que se producen a lo largo del tiempo en un material que puede ser, durante la aplicación del esfuerzo o después de cesar el mismo, y esta relacionado con las tensiones internas acumuladas en el material que se van liberando en forma gradual.

Módulo inicial (E).- También llamado módulo de elasticidad o módulo de Young, es una expresión de la carga específica necesaria para producir un pequeño alargamiento dentro de la zona elástica de la curva.

$$E = \frac{f}{A} = \text{tang } \alpha$$

Puesto que esta zona debe ser un segmento de la curva, el módulo inicial es también la pendiente en el origen de la curva carga-alargamiento. Se expresa en centiNewton sobre tex (cN/tex) como la carga específica.

Módulo secante al 2.5% ($E_{s, 2.5}$).- Es la pendiente de la recta trazada desde el origen hasta el punto de la curvatura que corresponde al alargamiento del 2.5%, o bien, es el resultado de dividir por 2.5 la carga específica que produce un alargamiento de 2.5%

$$E_{s, 2.5} = \frac{f_{2.5\%}}{2.5} \quad \text{Se expresa en centiNewton sobre tex (cN/tex).}$$

Tenacidad (θ).- Es la carga específica de rotura. Se expresa como carga específica en centiNewton sobre tex (cN/tex) y este valor coincide en el primer caso con el valor en kilómetros (10^3 m) de la llamada longitud de rotura, designada por algunos como la longitud de carga, que es la longitud de probeta que llegaría a la escisión bajo la carga de su propia masa.

Trabajo de rotura (Tr , Te).- También llamado trabajo de escisión, es el trabajo necesario para provocar la rotura (o incisión) de la probeta, corresponde al área bajo la curva carga-alargamiento desde cero al punto de rotura (o incisión). Se expresa con las unidades de centiNewton por centímetro ($cN \cdot cm$).

RELACIÓN DE FIGURAS

Número	Nombre	página
1	Clasificación reológica de los materiales	4
2	Tipos de comportamiento reológico	7
3	Representación de la resistencia (resorte) y émbolo en serie	9
4	Representación de la resistencia y émbolo en paralelo	9
5	Curva tensión Vs. deformación de la viscosa	19
6	Curva tensión Vs. deformación de varios materiales textiles	20
7	El factor de rotura y el factor trabajo	22
8	Recuperación elástica	24
9	Efectos instantáneos y dependientes del tiempo	25
10	Variación del alargamiento con la longitud molecular	26
11	Efecto de la humedad sobre las características carga Vs. alargamiento	28
12	Representación de una parte de una red sólida	29
13	Partes que conforman la gráfica esfuerzo Vs. deformación	35
14	Diferentes tipos de fuerzas aplicadas a un material	36
15	Oscilador amortiguado	37
16	Modelo potencial	44
17	Modelo de Maxwell	45
18	Modelo de Vangheluwe	48
19	Modelo de Zurek	49
20	Comparación del triángulo de hilatura del hilo convencional y compacto	56
21	Efecto de zunchado	57
22	Fotografía de la estructura externa de un hilo universal fabricado a partir de fibras cortas unidas por torsión	58
23	Dinamómetro universal	58
24	Representación de regresión lineal	61
25	Curva tenacidad Vs. alargamiento del hilo ejemplo	63
26	Cálculo de "A"	65
27	Cálculo de "B"	65
28	Cálculo de "C"	65
29	Curvas tenacidad vs. alargamiento de los hilos 1 y 2	68
30	Curvas tenacidad vs. alargamiento de los hilos 3 y 4	68

RELACIÓN DE FIGURAS

Número	Nombre	página
31	Curvas tenacidad vs. alargamiento de los hilos 5 y 6	69
32	Curvas tenacidad vs. alargamiento de los hilos 7 y 8	69
33	Curvas tenacidad vs. alargamiento de los hilos 9 y 10	70
34	Curvas tenacidad vs. alargamiento de los hilos 11 y 12	70
35	Curvas tenacidad vs. alargamiento de los hilos 13 y 14	71
36	Curvas tenacidad vs. alargamiento de los hilos 15 y 16	71
37	Curvas tenacidad vs. alargamiento de los hilos 17 y 18	72
38	Curvas tenacidad vs. alargamiento de los hilos 19 y 20	72
39	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 1)	96
40	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 2)	97
41	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 3)	98
42	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 4)	99
43	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 5)	100
44	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 6)	101
45	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 7)	102
46	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 8)	103
47	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 9)	104
48	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 10)	105
49	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 11)	106
50	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 12)	107
51	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 13)	108
52	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 14)	109
53	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 15)	110
54	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 16)	111
55	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 17)	112
56	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 18)	113
57	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 19)	114
58	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (hilo 20)	115
59	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 1)	116
60	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 2)	117

RELACIÓN DE FIGURAS

Número	Nombre	página
61	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 3)	118
62	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 4)	119
63	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 5)	120
64	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 6)	121
65	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 7)	122
66	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 8)	123
67	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 9)	124
68	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 10)	125
69	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 11)	126
70	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 12)	127
71	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 13)	128
72	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 14)	129
73	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 15)	130
74	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 16)	131
75	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 17)	132
76	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 18)	133
77	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 19)	134

RELACIÓN DE FIGURAS

Número	Nombre	página
78	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 20)	135
79	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 1)	136
80	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 2)	137
81	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 3)	138
82	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 4)	139
83	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 5)	140
84	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 6)	141
85	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 7)	142
86	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 8)	143
87	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 9)	144
88	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 10)	145
89	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 11)	146
90	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 12)	147
91	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 13)	148
92	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 14)	149
93	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 15)	150
94	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 16)	151

RELACIÓN DE FIGURAS

Número	Nombre	página
95	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 17)	152
96	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 18)	153
97	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 19)	154
98	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 20)	155
99	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 1)	157
100	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 2)	158
101	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 3)	159
102	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 4)	160
103	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 5)	161
104	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 6)	162
105	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 7)	163
106	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 8)	164
107	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 9)	165
108	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 10)	166
109	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 11)	167
110	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 12)	168
111	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 13)	169
112	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 14)	170
113	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 15)	171
114	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 16)	172
115	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 17)	173
116	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 18)	174
117	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 19)	175
118	Tenacidad Vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (hilo 20)	176

RELACIÓN DE TABLAS

Número	Nombre	página
1	Hilos textiles considerados en le estudio	53
2	Propiedades mecánicas de los hilos textiles considerados en el estudio	54
3	Datos leídos de la curva tenacidad Vs. Alargamiento del hilo ejemplo	64
4	Análisis de varianza	67
5	Parámetros estimados del modelo de Maxwell y Maxwell modificado	74
6	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 1)	75
7	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 2)	75
8	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 3)	76
9	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 4)	76
10	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 5)	77
11	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 6)	77
12	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 7)	78
13	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 8)	78
14	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 9)	79
15	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 10)	79
16	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 11)	80
17	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 12)	80
18	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 13)	81
19	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 14)	81
20	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 15)	82
21	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 16)	82
22	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 17)	83
23	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 18)	83
24	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 19)	84
25	Regresión no lineal del modelo de Maxwell (hilo 20)	84
26	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 1)	85
27	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 2)	85
28	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 3)	86
29	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 4)	86
30	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 5)	87

RELACIÓN DE TABLAS

Número	Nombre	página
31	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 6)	87
32	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 7)	88
33	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 8)	88
34	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 9)	89
35	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 10)	89
36	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 11)	90
37	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 12)	90
38	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 13)	91
39	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 14)	91
40	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 15)	92
41	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 16)	92
42	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 17)	93
43	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 18)	93
44	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 19)	94
45	Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (hilo 20)	94
46	Parámetros estimados de los modelos de Vangheluwe, Vangheluwe modificado con cuatro parámetros y Vangheluwe modificado con cinco parámetros	95
47	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 1)	96
48	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 2)	97
49	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 3)	98
50	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 4)	99
51	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 5)	100
52	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 6)	101
53	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 7)	102
54	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 8)	103
55	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 9)	104
56	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 10)	105
57	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 11)	106
58	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 12)	107
59	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 13)	108
60	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 14)	109
61	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 15)	110
62	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 16)	111

RELACIÓN DE TABLAS

Número	Nombre	página
63	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 17)	112
64	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 18)	113
65	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 19)	114
66	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (hilo 20)	115
67	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 1)	116
68	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 2)	117
69	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 3)	118
70	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 4)	119
71	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 5)	120
72	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 6)	121
73	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 7)	122
74	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 8)	123
75	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 9)	124
76	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 10)	125
77	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 11)	126
78	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 12)	127
79	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 13)	128
80	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 14)	129
81	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 15)	130
82	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 16)	131
83	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 17)	132
84	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 18)	133
85	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 19)	134
86	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (hilo 20)	135
87	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 1)	136
88	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 2)	137
89	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 3)	138
90	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 4)	139
91	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 5)	140
92	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 6)	141
93	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 7)	142
94	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 8)	143
95	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 9)	144

RELACIÓN DE TABLAS

Número	Nombre	página
96	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 10)	145
97	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 11)	146
98	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 12)	147
99	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 13)	148
100	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 14)	149
101	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 15)	150
102	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 16)	151
103	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 17)	152
104	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 18)	153
105	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 19)	154
106	Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (hilo 20)	155
107	Parámetros estimados del modelo de Zurek	156
108	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 1)	157
109	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 2)	158
110	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 3)	159
111	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 4)	160
112	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 5)	161
113	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 6)	162
114	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 7)	163
115	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 8)	164
116	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 9)	165
117	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 10)	166
118	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 11)	167
119	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 12)	168
120	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 13)	169
121	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 14)	170
122	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 15)	171
123	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 16)	172
124	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 17)	173
125	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 18)	174
126	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 19)	175
127	Regresión no lineal del modelo de Zurek (hilo 20)	176
128	Coefficiente de correlación	177
129	Arreglo rectangular de Guggenheim	182

RELACIÓN DE TABLAS

Número	Nombre	página
130	Interacciones obtenidas por el método de Newton-Rapson	186
131	Valores numéricos del modelo de Vangheluwe obtenidos por técnicas distintas	186
132	Suma de cuadrados de los residuos de los métodos de evaluación	188

INDICE

	TEMA	página
1.	RESUMEN	1
2.	ABSTRACT	2
3.	INTRODUCCIÓN	3
3.1	MODELIZACIÓN MATEMÁTICA	8
3.2	MODELOS VISCOELÁSTICOS	8
3.3	MODELIZACIÓN DE LAS CURVAS CARGA ESPECÍFICA-ALARGAMIENTO	10
4.	ANTECEDENTES	11
4.1	PROPIEDADES TEXTILES ESPECÍFICAS DE LA ESTRUCTURA DE LA MACROMOLÉCULA	14
4.2	IMPORTANCIA DEL ALARGAMIENTO EN LOS TEXTILES	16
4.3	ALGUNOS FACTORES QUE AFECTAN LAS PROPIEDADES TENSILES DE LOS TEXTILES	28
4.4	ELASTICIDAD	29
4.5	CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO	31
4.6	VISCOSIDAD	34
4.7	FLUIDOS NEWTONIANOS	34
4.8	FLUIDOS NO NEWTONIANOS	34
4.9	TENSIÓN Y COMPRESIÓN	35
4.10	VISCOELASTICIDAD	38
4.11	ELEMENTOS CONSTITUTIVOS	40
4.12	MODELOS ANALÓGICOS CUANTIFICABLES	42
4.13	MODELO POTENCIAL	44
4.14	MODELO DE MAXWELL	45
4.15	MODELO DE MAXWELL MODIFICADO	47
4.16	MODELO DE VANGUELUWE	48
4.17	MODELO DE ZUREK	49
5.	JUSTIFICACIÓN	50
6.	OBJETIVO	52
7.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	53
7.1	MATERIALES	54
7.2	SISTEMAS DE HILATURA	55

INDICE

	TEMA	página
7.3	MÉTODOS DE ENSAYO	59
7.3.1	REGRESIÓN LINEAL SIMPLE	59
7.3.2	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	61
7.3.3	MUESTREO	63
8.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	73
8.1.	REGRESIÓN NO LINEAL DEL MODELO DE MAXWELL	75
8.2.	REGRESIÓN NO LINEAL DEL MODELO DE MAXWELL MODIFICADO	85
8.3.	REGRESIÓN NO LINEAL DEL MODELO DE VANGHELUWE	95
8.4.	REGRESIÓN NO LINEAL DEL MODELO DE VANGHELUWE MODIFICADO CON CUATRO PARÁMETROS	116
8.5.	REGRESIÓN NO LINEAL DEL MODELO DE VANGHELUWE MODIFICADO CON CINCO PARÁMETROS	136
8.6.	REGRESIÓN NO LINEAL DEL MODELO DE ZUREK	156
8.7.	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	177
9.	CONCLUSIONES	178
10.	RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS	180
10.1.	MÉTODO DEL HIPERPLANO	180
10.2.	TÉCNICA DE MÍNIMOS CUADRADOS	183
11.	BIBLIOGRAFÍA	189

1. RESUMEN

En la presente tesis, se estudia el comportamiento viscoelástico de veinte hilos textiles. Se ha modelizado la viscoelasticidad de cada uno de estos hilos a través de modelos mecanicistas formados por muelles y émbolos (la componente elástica se halla representada por el muelle, y por su comportamiento, estaría relacionado con la respuesta instantánea al esfuerzo recibido por la variación de las dimensiones que serían recobradas al cesar el esfuerzo., Mientras que el émbolo explica la variación de las dimensiones que se producen a lo largo del tiempo en un material, ya sea durante la aplicación del esfuerzo, o bien después de cesar el mismo y estaría relacionado con las tensiones internas acumuladas en el material, que se liberan gradualmente). Como lo son los modelos de Maxwell, Maxwell modificado, Vangheluwe, Vangheluwe modificado y finalmente Zurek. Así mismo, se obtuvieron los coeficientes de correlación de las propiedades mecánicas de los hilos y los parámetros de los modelos aplicados.

2. ABSTRACT

In this thesis, the viscoelastic behaviour of twenty textile yarns are studied. Viscoelasticity behaviour of each of these yarns was modeled through mechanical models formed springs and dashpots (the elastic component is represented by spring and through its behaviour will be related to the instantaneous force received by dimension variations which will be recovered when the force is eliminated. While the dashpot describes the dimension variations which are produced during a certain period in a material, which may be during the force application or once this is eliminated; this will be related with the internal accumulated tensions which are slowly liberated. This is done through Maxwell models, Maxwell modified, Vangheluwe, Vangheluwe modified and finally Zurek. By correlations coefficient of the mechanical properties of the yarns and the applied models parameters are obtained.

3. INTRODUCCIÓN

La **reología** se define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia. Esto es, cómo un material responde a una fuerza.

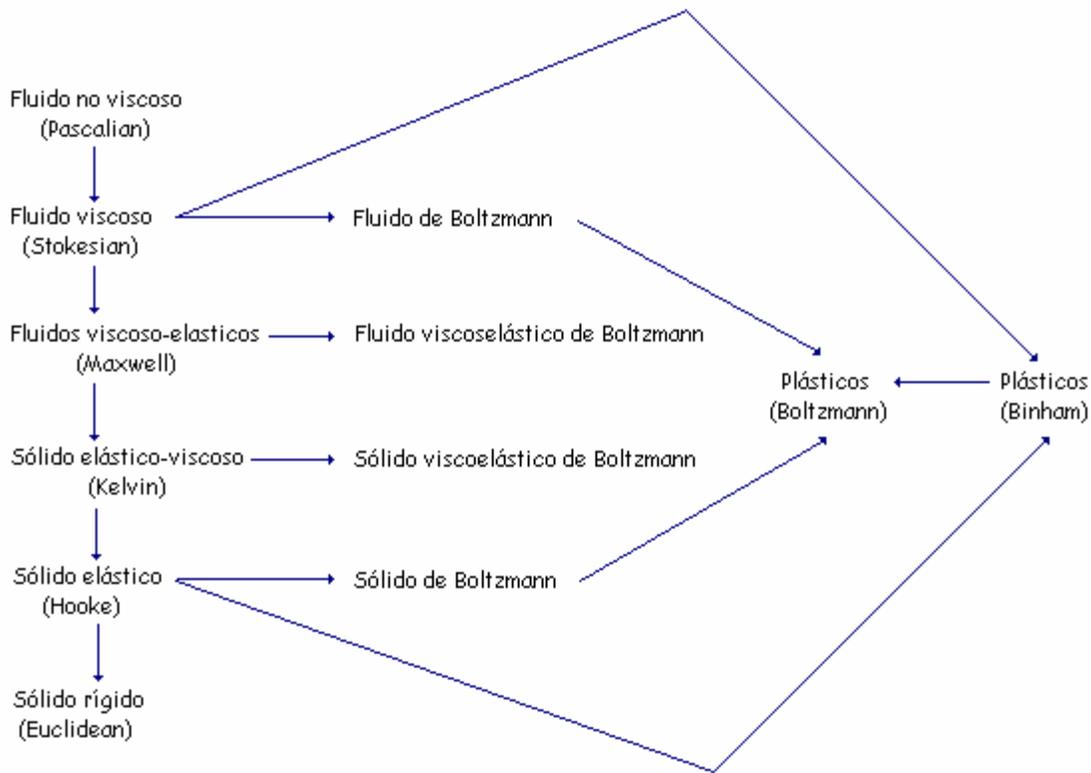
En dichos fluidos hay un alejamiento de las simples relaciones newtonianas. Por ejemplo, en algunos líquidos la viscosidad aumenta al aumentar el gradiente; es decir cuanto más rápido se mueve el fluido, más viscoso se vuelve. Dichos líquidos se dice son dilatantes y el fenómeno que exhiben se llama dilantancia. Ocurre en algunas pastas y suspensiones. Más común, sin embargo, es el efecto contrario, en el que la velocidad no sólo depende del gradiente de velocidades, sino también del tiempo durante el cual ha sido aplicado. Estos líquidos se dice que exhiben tixotropía. Cuanto más rápido se mueve un fluido tixotrópico, menos viscoso se vuelve. Esta propiedad es utilizada en las pinturas que no gotean (que son más viscosas sobre la brocha que en la pared) y en los aceites lubricantes (que se vuelven más finos cuando las partes que están lubricando comienzan a moverse). Otro ejemplo es el fluido no newtoniano de macromoléculas en disolución o en fundidos de polímeros. En este caso el esfuerzo de cizalladura F no es paralelo a los planos de cizalladura y la relación lineal no se aplica. En general, los muchos tipos de fluidos no newtonianos son algo complicados y aún no ha sido desarrollada ninguna teoría para explicarlos del todo.

Existen dos tipos diferentes de comportamientos reológicos bien marcados:

Fluidos Newtonianos y Fluidos No Newtonianos. En el primero la viscosidad es constante independientemente del esfuerzo de corte al cual se somete el fluido y en el segundo la viscosidad depende del esfuerzo de corte aplicado. Un gráfico de

esfuerzo de corte ó viscosidad en función de la velocidad de corte se conoce como reograma. El reograma para un fluido Newtoniano es una línea recta cuya pendiente es la viscosidad. La mayoría de los materiales con algún significado industrial son no Newtonianos. Hay varios tipos de comportamientos no Newtoniano.

Fenómeno reológico. En la clasificación de varios tipos de comportamiento que son exhibidos por materiales reales como lo que en la **figura 1** se presenta como clasificación reológica de los materiales.



Clasificación reológica de los materiales

Figura 1

Por el segundo axioma de la reología, todos los materiales poseen todas las propiedades reológicas, a menos que, se tengan otras condiciones; por lo tanto se puede idealizar el comportamiento de los materiales reales.

Modelo mecánico de un fluido. El índice de extensión del émbolo es proporcional a la fuerza aplicada.

El **modelo de Pascalian** (fluido no viscoso) es obtenido por la suposición de la viscosidad del fluido en el émbolo que viene siendo menor y menor, así que el modelo no ofrece resistencia a la extensión.

El **modelo mecánico del sólido elástico** es un resorte que se extiende en forma proporcional a, o en función de la fuerza aplicada, si la fuerza es removida, el resorte se revierte de forma instantánea.

El **modelo de Euclidean** (sólido rígido) es obtenido suponiendo que el resorte viene siendo más rígido, termina por ser inextensible.

El **modelo mecánico de Maxwell** (viscoelástico) es un resorte y un émbolo en serie que en forma continua incrementa su extensión (fluye). El modelo de Maxwell exhibe el fenómeno de relajación suponiendo que el modelo es sujeto a una extensión repentina que es mantenida. La extensión inicial es solo en el resorte, debido a que una fuerza fina no puede causar una extensión fina del émbolo en un intervalo de tiempo. Conforme avanza el tiempo la contracción del resorte y la consecuente extensión del émbolo mantiene una elongación constante en el sistema. Cuando el resorte es contraído llega a su posición de equilibrio, el proceso de deformación interna se detiene y la fuerza requerida para mantener la elongación sufre una relajación completa.

El modelo de Kelvin o Voigt (viscoelástico) es el arreglo de un resorte y un émbolo en paralelo. Éste arreglo es un modelo de un sólido, desde la máxima extensión, la cual puede llegar al límite por la fuerza aplicada y es independiente del tiempo de aplicación. El modelo de Kelvin exhibe el fenómeno de deslizamiento.

El modelo mecánico de las sustancias de Boltzmann muestra lo mismo que el de Stokesian, Maxwell, Hooke, etc., excepto que en el de Boltzmann pasa el historial de los elementos, tal que en un fluido de Boltzmann la "viscosidad" en el cambio del émbolo con el tiempo con cada índice de extensión se mantiene constante.

En el fluido de Boltzmann el comportamiento dependiente del tiempo se manifiesta como un cambio progresivo en la viscosidad que es cortado a un índice de cizalladura. Si la viscosidad decrece con el tiempo, el fenómeno se llama tixotrópico; si la viscosidad se incrementa con el tiempo, el fenómeno es llamado reopexico o, antiisotrópico.

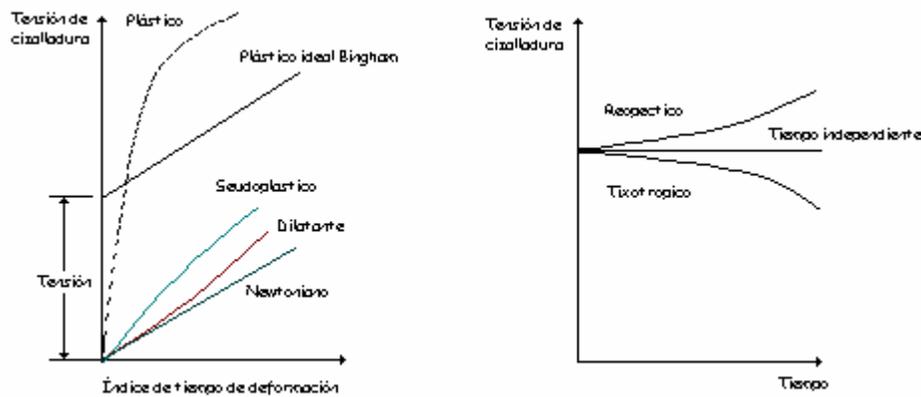
El modelo plástico de Bingham muestra porque la fricción entre un bloque y una base no tiene una extensión, a menos, que se le aplique una fuerza excesiva, la fuerza de fricción estática.

Las propiedades físicas y químicas de los materiales dependen del grado de cristalinidad, también como de la "estructura cristalina" y su morfología. La estructura cristalina se refiere a las cadenas moleculares, en una conformación particular son paquetes de una estructura tridimensional, aunque la morfología cristalina se refiere al tamaño y forma de las cristalitas, su arreglo y su interconexión con la parte amorfa.

La cristalinidad confiere en los polímeros las propiedades características de elasticidad mecánica y resistencia a los solventes que determinan su selección de ciertas aplicaciones en preferencia a los polímeros amorfos.

La cristalización provoca un cambio discontinuo en la entalpía, volumen, etc., esto es, la transmisión termodinámica de primer orden. La habilidad cristalina de los polímeros esta gobernada por el mismo factor estructural como de pequeñas moléculas tales como, interacción de energía y geometría y, por factores específicos de las cadenas del polímero, como es, la regularidad de la cadena.

Los fluidos tienen una variable de proporcionalidad entre tensión e índice de deformación llamada no newtoniana. En tales casos, la proporcionalidad puede depender de la cantidad de tiempo de exposición a la tensión también como sobre la magnitud de la tensión. Algunas sustancias, tales como algunos plásticos exhiben un punto de tensión bajo el cual se comportan como un sólido y sobre el cual se comportan como fluidos. La reología es el sujeto por el cual se tratan los fluidos plásticos y no newtonianos. En la **figura 2** se muestra el tipo de fluido y comportamiento plástico en los diagramas de índice de deformación contra tensión y tiempo contra tensión.



Tipos de comportamiento reológico

Figura 2

3.1 MODELIZACIÓN MATEMÁTICA

Un problema del mundo real es el que se encuentran un físico, un economista, un ingeniero o cualquier otra persona en sus condiciones normales de trabajo de la vida cotidiana. Las matemáticas pueden ayudar a resolver el problema. Pero para aplicarlas es con frecuencia necesario llevar a cabo una abstracción, elaborando lo que se llama un **modelo matemático** del problema original del mundo real, que se corresponde en aproximación con él. La elaboración de ese modelo lleva consigo por lo general la práctica de hipótesis y simplificaciones; es entonces cuando se puede estudiar el problema matemático y quizá resolverlo. Reinterpretando su solución en términos del mundo real, se puede en ocasiones (no siempre) obtener una solución adecuada del problema original. En la elaboración de un modelo se hacen algunos supuestos y se consideran algunas simplificaciones de la realidad. Un modelo se puede representar usando relaciones y funciones.

3.2 MODELOS VISCOELÁSTICOS

El comportamiento mecánico de las fibras es viscoelástico, combinando las características de elasticidad y viscosidad. Un camino para analizarlo es la utilización de modelos, compuesto de un resorte elástico ideal y de un émbolo viscoso, Los resortes aplicando la ley de Hooke, así que:

$$f = E \epsilon \quad (\text{ec. 1})$$

Donde:

E es una constante y,

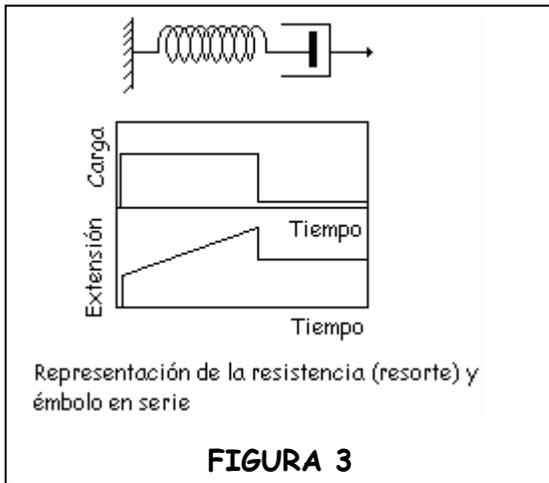
ϵ es la deformación

Mostrará la recuperación perfecta; el émbolo seguirá la ley de newton con,

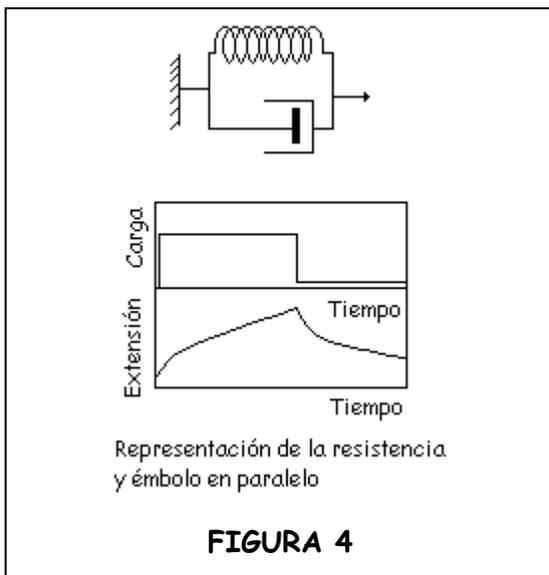
$$\text{tensión } f = \eta \cdot d\epsilon/dt \quad (\text{ec. 2})$$

Donde η es constante y,

$d\epsilon/dt$ es el índice de deformación



Si un resorte y un émbolo son arreglados en serie, como se muestra en la **figura 3**, tendrán una extensión instantánea sobre la aplicación de la carga, seguido por un deslizamiento a un índice constante.



Si hay un arreglo en paralelo, como se muestra en tal **figura 4**, primero se deslizará.

Sin embargo, podrá requerirse de arreglos muy complicados de elementos ideales para que den una representación completa del comportamiento de las fibras, exhibiendo el primero y el segundo deslizamiento, elástico e inelástico de extensión instantánea, y una

relación no lineal entre la extensión, carga, y tiempo. Ésta multiplicación del número de elementos involucrados no simplifica el problema, y "la analogía mecánica" en general

es un sustituto insatisfactorio de reconocimiento directo de la fuerza molecular. Hay varias razones para permitir que la elasticidad imperfecta sea una característica adecuada del comportamiento molecular, de la mayor realidad física que en casos extremos de elasticidad y viscosidad ideal se dan.

3.3 MODELIZACIÓN DE LAS CURVAS CARGA ESPECÍFICA-ALARGAMIENTO

Cuando las fibras son de forma mecánica deformadas, tres regiones pueden definirse de acuerdo a la forma de la curva carga específica-alargamiento: La región inicial, la región de trabajo, y la región de refuerzo.

En la región inicial, los enlaces secundarios soportan las distorsiones, y el comportamiento de las fibras son como las de un sólido cristalino. En la región de trabajo, en la cadena macromolecular ocurren despliegues a cualquier resistencia, con una velocidad proporcional al tiempo de relajación. El comportamiento de las fibras es como el de un material plástico, un sólido amorfo o un líquido. En la zona de refuerzo, ocurre una nueva configuración de la fibra, siendo más resistente la deformación.

4. ANTECEDENTES

Los productos hechos de fibras que por lo general conllevan a las propiedades físicas y químicas que pasan a través de los procesos (desde hilatura hasta teñido); Pueden ser analizados por un estudio que determina el comportamiento viscoelástico de las fibras desde el estado de su primera deformación hasta el punto de rotura.

Las propiedades mecánicas se relacionan a la microestructura. El estado reológico describe la interrelación entre tensión y deformación, los cuales dependen de la naturaleza y de la estructura del material. La forma de las curvas carga específica-alargamiento refleja la orientación molecular y la distribución amorfa y cristalina.

La viscoelasticidad es de gran complejidad debido a las dificultades conceptuales. Es posible distinguir dos enfoques para el sujeto que es designado como enfoque mecánico y como enfoque molecular. Tratar de describir el comportamiento viscoelástico de un cuerpo por medio de un esquema matemático el cual no se ocupa de la estructura molecular del cuerpo, aunque después un enfoque fisicoquímico deduzca las propiedades viscoelásticas de la arquitectura de la molécula. La dificultad fundamental que se ha encontrado es que los materiales poliméricos son grandes moléculas de estructuras complejas. Estas estructuras son muy complejas, si cada una de ellas se conoce en suficiente detalle, lo cual, en general, para esto no se realiza un análisis matemático. Es por lo tanto necesario la utilización de modelos matemáticos para conocer mejor su estructura.

Las fibras constituyen un estado morfológico de la materia caracterizado por una elevada longitud con relación a su finura. Es importante que ésta materia contenga

propiedades específicas para que tenga cualidades textiles, es por lo tanto necesario, conocer la estructura de las moléculas de la materia textil.

La estructura afecta a la forma exterior de la fibra (sección longitudinal y transversal), la macroarquitectura distingue las diferentes partes que integran a la fibra, las cuales podemos nombrar; capas, células, paredes, piel y corazón. La microarquitectura fibrilar es uno de los estados más importantes porque a éste nivel de la estructura existe la fibrilla; todas las fibras ya sean naturales o sintéticas presentan un elemento en común, la fibrilla que posee una morfología comparable a la de la fibra, es decir, una gran longitud en relación a la sección, podemos decir por lo tanto, que la fibrilla es el "primer eslabón" de nuestra cadena macromolecular; a partir de éste estado pasamos al nivel de la molécula, la cual, salvo contadas ocasiones, no es perceptible mas que por lo efectos de su magnitud o de su forma en ciertos fenómenos físicos o químicos.

La morfología de la materia textil es su estructura molecular, que puede ser conocida por medios físico-químicos como la osmometría, la viscosimetría, la difusión disimétrica de la luz, la birrefringencia de derrame, o, químicos como la dosificación de grupos terminales.

La composición química es el último estado de la estructura, en donde vemos cómo los átomos constituyen la macromolécula, se pueden utilizar métodos clásicos de análisis químico como son la cromatografía, la electrofóresis o la espectrografía de masa.

En cuanto a las propiedades textiles para que una fibra sea catalogada como "fibra textil" debe presentar características mecánicas, físicas y químicas. Algunas de éstas características son generales y se encuentran en todas las fibras textiles, con una intensidad casi igual. Dentro de tales características podemos mencionar propiedades

mecánicas como; la resistencia a la tracción o la viscoelasticidad. Toda propiedad textil es el resultado del conjunto de cualidades particulares de cada fibra.

Las propiedades textiles podemos considerarlas a partir de dos criterios; Las que son necesarias e indispensables para que la fibra sea "textil" y las que hacen de una fibra una "buena fibra textil". Por lo anterior podemos decir que las primeras son de orden científico y las segundas de orden tecnológico.

Las propiedades que son necesarias para que una fibra sea textil son las Propiedades mecánicas. Es necesario que la fibra soporte los esfuerzos de estiraje, de flexión, de torsión, de corte.

El comportamiento mecánico de un elemento de la "estructura" dependerá:

- De las propiedades intrínsecas de los elementos que pertenecen al nivel inmediato inferior
- De la organización geométrica de éstos elementos unos en relación con otros.

Las propiedades del tejido dependen de las propiedades intrínsecas de los hilos y de la contextura que define la forma de la disposición de los hilos entre ellos. Las propiedades de una fibra son el resultado de las propiedades de sus elementos de la macroarquitectura (capas, paredes, células) y de la construcción geométrica de ésta macroarquitectura. Y así, hasta la macromolécula, para lo cual, las propiedades dependen de las del origen y organización geométrica de las "causas" a lo largo de la macromolécula.

La influencia de la temperatura es un factor importante en las propiedades mecánicas, también la influencia del agua, la cual, juega un papel de plastificante; ésta influencia puede variar según el grado de polimerización y de las variaciones de la estructura a

diferentes niveles. El papel del agua será diferente según el estado en el cual se encuentre; dentro de la escala macromolecular el agua actuará basada en los fenómenos de "recuperación de humedad"; en la escala fibrilar, el agua actuara tanto en forma de vapor, como en forma líquida o condensada. En la escala de la fibra, el agua intervendrá en forma de vapor sobre la estructura superficial de las fibras para modificar su resistencia superficial al frote o en estado líquido por las acciones capilares.

4.1 PROPIEDADES TEXTILES ESPECÍFICAS DE LA ESTRUCTURA DE LA MACROMOLÉCULA

Propiedades mecánicas. El módulo de elasticidad inicial depende en forma directa de la estructura de los segmentos rígidos. Si más elevada es su cohesión interna, más enérgicas serán las interacciones que las enlazan a los segmentos de macromoléculas próximas y más elevado será el módulo. El número de segmentos rígidos por 100 covalencias de cadena y su forma de distribución (regular o no) influyen en forma cuantitativa sobre el módulo inicial.

El carácter viscoelástico y la deformabilidad bajo los esfuerzos transversales están en correlación directa con la naturaleza, densidad y regularidad de distribución de los segmentos flexibles. Los valores numéricos de estas propiedades y otras dinamométricas dependen también de los factores de otros niveles de estructura de la fibra.

Propiedades físicas. Si existe un punto de fusión depende éste de las fuerzas de cohesión intermoleculares, considerada como una propiedad intrínseca de la macromolécula. La densidad de las fibras depende de la estructura de la

macromolécula. Su composición en C, H, O, N, Cl, F, etc. Influye en forma directa en la densidad absoluta.

Los caracteres de solubilidad son dependientes también de la estructura macromolecular. Las fibras son casi en su totalidad insolubles en agua. La insolubilidad es función del tamaño de las macromoléculas, siendo las más largas las más insolubles.

Propiedades químicas. Las propiedades químicas dependen de dos factores principales; la naturaleza química y el factor estérico (tamaño y forma).

No existe discontinuidad entre zonas cristalinas y zonas amorfas. La materia fibrosa no esta formada por una infinidad de pequeños y perfectos cristales rodeados de sustancia amorfa.

Las macromoléculas individuales intervienen de forma alternativa de una zona donde la orientación es paralela y muy grande en zonas en donde el paralelismo es imperfecto.

Las propiedades mecánicas son el resultado de las propiedades intrínsecas del elemento de estructura del nivel inmediato inferior y del modo de distribución geométrica de éste elemento en relación con sus vecinos.

Las propiedades mecánicas de la fibrilla (no medibles de forma directa) dependen de los siguientes factores:

- El grado de polimerización de las macromoléculas y su polidispersidad.
- El tamaño relativo de las zonas cristalinas en relación con las zonas amorfas, en consecuencia, de las variaciones a corto o largo plazo del orden lateral.

- La orientación relativa de las zonas cristalinas en relación al eje de la fibrilla, y su dispersión alrededor de un valor medio (grado de orientación)

Todas las propiedades en relación con el agua y los reactivos gaseosos o líquidos están influenciados por la estructura de la fibrilla y por el empaquetado de las macromoléculas. La fuerte cohesión de las zonas cristalinas se opone en cierta medida a la penetración de moléculas extrañas, desde el momento en que su tamaño sobrepasa un límite. Una medida del grado de cristalinidad se basa en esta propiedad. La degradación química de las fibras empieza en las regiones amorfas, lo cual explica que la degradación química vaya acompañada con frecuencia de un aumento en el grado de cristalinidad.

4.2 IMPORTANCIA DEL ALARGAMIENTO EN LOS TEXTILES

La deformación o alargamiento absoluto Δl por lo general se relaciona con la longitud inicial l_i y se expresa en porcentaje bajo el nombre de alargamiento relativo.

$$\text{Alargamiento relativo} = \frac{\Delta l}{l_i} 100 \quad (\text{ec. 3})$$

Cuando una fibra experimenta varias sollicitaciones y si la primera provoca una deformación plástica, para las demás sollicitaciones la longitud inicial será diferente de la verdadera longitud "inicial", y por consiguiente el alargamiento relativo se vuelve ambiguo.

Para evitar esto se puede definir un "alargamiento logarítmico", racional.

$$\epsilon = \int_1^2 d \epsilon = \int_1^2 \frac{dl}{l} = L_n \left[\frac{l_2}{l_1} \right] \quad (\text{ec. 4})$$

Este alargamiento logarítmico tiene propiedades aditivas:

$$\epsilon_{13} = L_n = L_n \left(\frac{l_3}{l_2} \times \frac{l_2}{l_1} \right) = L_n \frac{l_3}{l_2} + L_n \frac{l_2}{l_1} = \epsilon_{12} + \epsilon_{23} \quad (\text{ec. 5})$$

Por otra parte permite definir un coeficiente de Poisson válido incluso para deformaciones permanentes:

$$\nu = - \frac{L_n \left(\frac{l_{j2}}{l_{j1}} \right)}{L_n \left(\frac{l_{i2}}{l_{i1}} \right)} \quad (\text{ec. 6})$$

Que conduce a $\nu = 0,5$ para las deformaciones a volumen constante. A pesar de las ventajas reales del "alargamiento logarítmico". Se utiliza casi en exclusivo para el alargamiento relativo.

Longitud de rompimiento. La "longitud de rompimiento" es la longitud del espécimen, el cual rompe bajo su propio peso cuando se deja colgar en forma vertical. La expresión de alargamiento en términos de longitud de rompimiento es útil para las comparaciones del alargamiento de las diferentes estructuras de las fibras; por ejemplo, de la comparación del alargamiento de una fibra individual con el alargamiento del hilo. La unidad de longitud de rompimiento es el kilómetro o, sus múltiplos.

Si por ejemplo, un hilo de rayón viscosa 100 denier rompió a una carga de 185g, la longitud de rompimiento será:

$$\frac{(185g)(9000m/g)}{(100denier)\left(\frac{1000m}{1km}\right)} = 16.65km$$

Curva carga específica-alargamiento. Una curva de extrema importancia que es producida cuando la carga sobre un espécimen es argumentada contra el desplazamiento. Ésta curva describe el comportamiento del espécimen de la carga cero y el desplazamiento sobre el punto de rompimiento.

El estudio cercano de ésta curva tiene información de naturaleza muy importante, el módulo inicial de Young, el trabajo de ruptura, punto de fluencia, etc.

Las curvas carga específica-alargamiento de la estructura básica de los hilos reflejan las características de la fibra o fibras de las cuales están construidas, se modifican de acuerdo al método utilizado en su construcción, por ejemplo, torsión, tejido, acabado físico y químico. Un estudio de las propiedades de las fibras es por lo tanto de extrema importancia.

La forma de la curva carga específica-alargamiento de una fibra es gobernada en principio por su estructura molecular; Una nota general y simplificada se muestra en la **figura 5**.

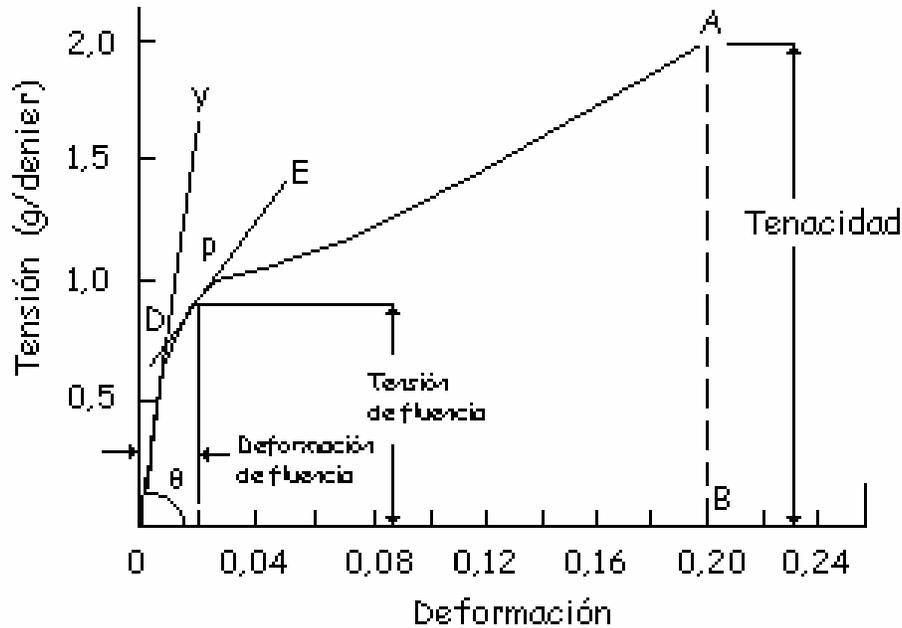


Figura 5

Curva Tensión-deformación de la viscosa, derivada de una curva Carga-elongación de un hilo 147 denier en atmósfera estándar.

(1) DE // OA, P es el punto de fluencia.
Por lo tanto, Tensión de fluencia = 0,88g/denier
Deformación de fluencia = 0,02

(2) Módulo inicial de Young = $\tan \theta = \frac{1,66}{0,02} = 83 \text{ g / denier}$

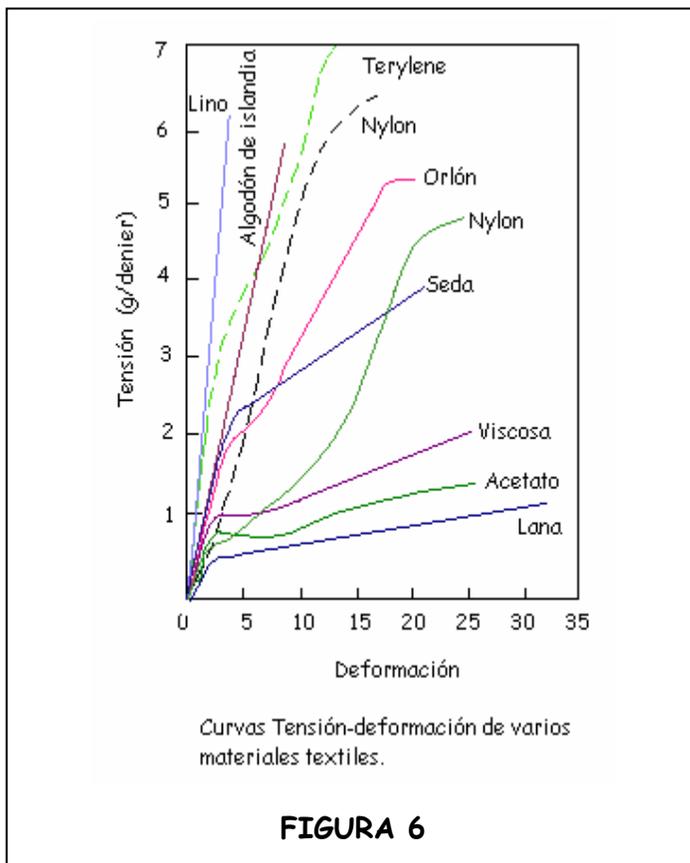
(3) Tenacidad al rompimiento = 1,85 g/denier

(4) Extensión al rompimiento = $0,20 \times 100 = 20\%$

Cuando una fuerza extrema es aplicada a una materia, es balanceada por una fuerza interna desarrollada en la estructura molecular del material. Por éste reconocimiento de la estructura de la fibra nos damos cuenta del diseño tridimensional de las cadenas moleculares; algunos arreglos de una forma ordenada, conocidos como regiones cristalinas y algunas otras conocidas como regiones amorfas. En estados anteriores al alargamiento del material, la elongación es en principio concerniente a la deformación

de las partes amorfas en la cual los enlaces primarios y secundarios son alargados y rotos. Si la tensión fue removida a éste rango la mayor extensión se recuperará y el material podrá exhibir propiedades elásticas.

Por la creciente tensión, la curva tensión-deformación se hace más aguda y una larga deformación o extensión es producida por pequeños incrementos en la tensión. Una clase de "fluido elástico" del material ocurre. Las cadenas moleculares se reordenan entre ellas con nuevos rompimientos de enlaces secundarios. Éste reordenamiento de las moléculas coloca el material en una mejor posición para resistir nuevas tensiones e índices de extensión decreciente. La curva tensión-deformación empieza a flexionarse a través del eje de tensión hasta que llega al punto de rompimiento.



Dado que los diferentes materiales tienen diferentes estructuras moleculares se deduce que sus curvas tensión-deformación serán también diferentes. La **figura 6** muestra un número de curvas tensión-deformación de las fibras más comunes utilizadas. Ya que los tratamientos químicos y físicos afectan las propiedades de tensión y deformación de los textiles.

Módulo inicial de Young. Una parte de primordial importancia de la curva tensión-deformación es la parte inicial donde empieza en cero la tensión y la deformación. En la **figura 5** podemos ver que la primera parte de la curva es continua, indicando una relación lineal entre la tensión y la deformación. En otras palabras, esta parte de la curva tiene un comportamiento que obedece la ley de Hooke. En realidad, esta parte de la curva es algunas veces referida como la 'región Hookeana'. El significado de ésta, es que cuando la carga es removida el material recupera su longitud original o casi el total de su longitud original.

La tangente del ángulo entre la parte inicial de la curva y el eje horizontal es la razón de tensión entre deformación. Esta razón es determinada como el módulo de Young, dada una medición de la fuerza requerida para producir una pequeña extensión. Un alto módulo indica inextensibilidad y un bajo módulo una gran extensibilidad. En los textiles utilizamos el término módulo inicial de Young y, describe la resistencia inicial a la extensión de un material textil.

Si la tensión está en unidades de gramos por denier, entonces el módulo inicial de Young estará también en gramos por denier porque la deformación es una fracción y no tiene unidades. Otra forma de expresión del módulo inicial de Young es en kilogramos peso del material considerado.

Punto de fluencia. El punto de fluencia en una gráfica se ubica en donde existe una flexión de la curva. Las grandes extensiones son producidas por pequeños incrementos relativos en la tensión y la mayor deformación es irrecuperable. Ésta flexión o región de fluencia es localizada por el punto de fluencia, el cual se determina de forma geométrica. El punto al cual la tangente de la curva es paralela a la línea que une el origen y el punto de rompimiento que es tomado como el punto de fluencia.

Es el punto más allá del cual el trabajo no es en su totalidad recuperable y lleva a la deformación permanente.

Por lo tanto el punto de fluencia puede ser definido en términos de tensión de fluencia y tensión de deformación.

Un término alternativo del punto de fluencia es el "límite de proporcionalidad", por ejemplo, donde los casos de extensión son proporcionales a la tensión, y al "límite elástico".

Trabajo de rotura. Esta es una medición de la 'resistencia' del material (ver figura 7). Su energía o trabajo requerido para romper el espécimen. El área bajo la curva de la curva carga específica-alargamiento representa el trabajo realizado en el alargamiento del espécimen al punto de rompimiento y por lo tanto las unidades de trabajo de rotura serán las unidades de trabajo, haciendo las respectivas conversiones.

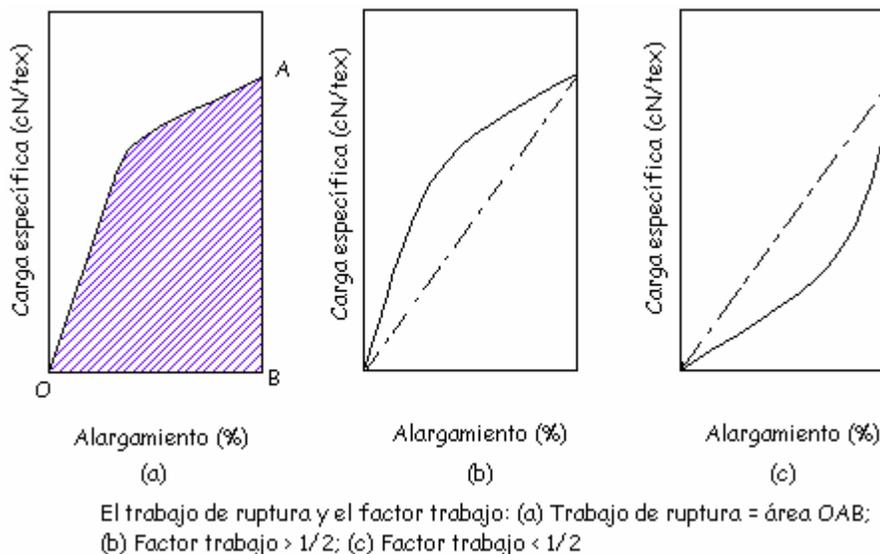


Figura 7

El trabajo a la rotura será proporcional a la sección transversal del espécimen y a su longitud. Por lo tanto, en orden a lo permitido de las comparaciones realizadas del trabajo a la rotura puede ser expresado en gramos-centímetro por denier por centímetro de longitud:

$$\frac{g.cm}{den.cm}$$

Esto puede reducirse a gramos/denier.

Factor de trabajo. Si la ley de Hooke obedece en su totalidad, la prueba de la carga cero a la carga de rompimiento, la curva carga específica-alargamiento podrá ser una línea recta. La razón será por lo tanto igual a $\frac{1}{2}$.

$$\frac{\text{área bajo la curva}}{(\text{rompimiento de tensión})(\text{rompimiento de deformación})} \quad (\text{ec. 7})$$

Para una curva particular ésta razón es conocida como factor de trabajo. Así que, de una curva la cual es cóncava hacia el eje de la deformación (horizontal) el factor de trabajo es mayor a $\frac{1}{2}$ y, al contrario, si la curva es cóncava hacia el eje de la tensión el factor de trabajo es menor a $\frac{1}{2}$ (**ver figura 7**).

Recuperación elástica. La elasticidad puede ser definida como la propiedad de un cuerpo el cual es tendido para recuperar su tamaño original y su forma después de la deformación. Con anterioridad el espécimen permaneció tenso a los valores dentro del límite de recuperación elástica a su tamaño original después de que la tensión fue removida. El poder de recuperación de la extensión dada puede expresarse por el valor de recuperación elástica.

$$\text{recuperación elástica} = \frac{\text{extensión elástica}}{\text{extensión total}} \quad (\text{ec. 8})$$

Por ejemplo (ver figura 8), si la longitud del espécimen original fue **AB** y fue alargado a la longitud de **AD**, la extensión total podrá ser **BD**. Después de remover la carga la longitud puede ser **AC**. La longitud **CD** es así la "extensión elástica". Por lo tanto:

$$\text{recuperación elástica} = \frac{CD}{BD}$$

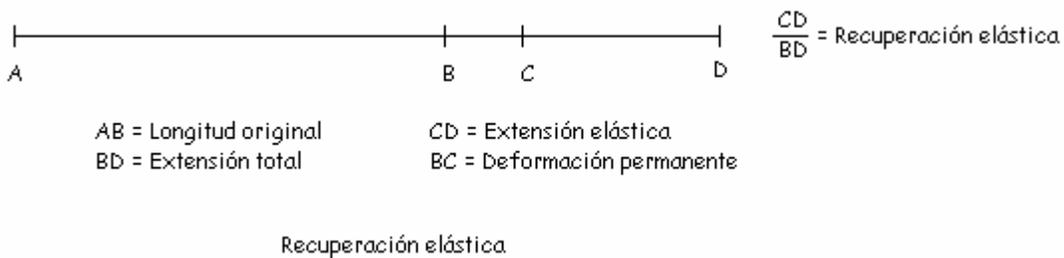


Figura 8

Los materiales elásticos perfectos tendrán una recuperación elástica de 1.0, aunque los materiales sin ningún poder de recuperación tendrán una recuperación cero. La recuperación elástica puede ser expresada como un porcentaje.

Los valores de la recuperación elástica son afectados por varios factores, incluyendo el tiempo permitido para recuperarse, la humedad en el espécimen, y el total de extensión utilizada en la prueba. Por lo tanto, según las comparaciones realizadas entre diferentes materiales, es necesario para especificar las condiciones bajo las cuales la recuperación elástica esta determinada. Es quizá útil en éste punto tener una breve observación al efecto del tiempo y extensión sobre los valores de recuperación elástica.

Efectos instantáneos dependientes del tiempo. El estudio del comportamiento de un espécimen puede dividirse en "efectos instantáneos" y en "efectos dependientes del tiempo". Considerando las gráficas mostradas en la **figura 9**. Una carga constante es aplicada a un espécimen por un periodo de tiempo, **OT**. En inicio el espécimen se extiende rápido, el efecto es instantáneo y entonces es menos rápido el efecto dependiente del

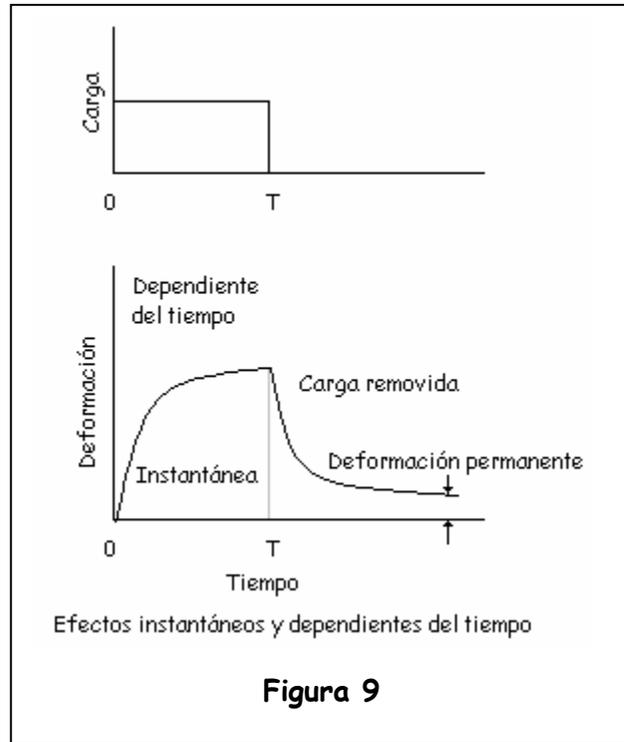
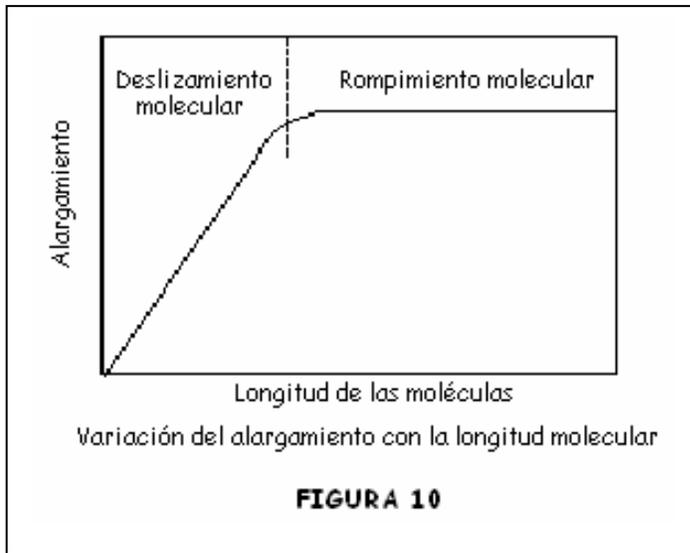


Figura 9

tiempo. El efecto total está compuesto de dos elementos, la extensión "instantánea" y la extensión "dependiente del tiempo" el cual condiciona el desplazamiento. Sobre la carga removida del espécimen se recupera rápido la primera vez y después es más lenta con quizá pequeñas cantidades de extensión residual a las cuales llamaremos "grupo permanente".

La **extensión instantánea** está compuesta de dos cantidades la "extensión elástica", ésta es recuperable, y la extensión "plástica o permanente" la cual no es recuperable. De forma similar, la dependencia del tiempo "desplazamiento" puede estar considerada en dos partes, "desplazamiento primario" que es recuperable y el "desplazamiento secundario" que no lo es.



La rotura puede ocurrir por una de dos razones, o una combinación de ambas. Como la estructura es deformada, las interacciones pueden romperse, y las moléculas se deslizan unas sobre otras. De forma alternativa, las moléculas pueden romperse primero. Si las moléculas están muy largas hay

poco cambio en su deslizamiento de una sobre otra, porque les ayuda el poco espacio que tienen para moverse. Las moléculas cortas se deslizarán de forma muy fácil. Trazando la resistencia contra la longitud de las moléculas, podemos esperar tener una curva como la de la **figura 10**, aunque el resbalamiento es el mecanismo, la resistencia se incrementará conforme se incremente la longitud, pero, cuando el rompimiento molecular es dominante, la longitud no tiene influencia en la resistencia. En las fibras de celulosa natural, la longitud molecular es mucho más grande que el valor crítico hacia el cual envía los deslizamientos hacia otra parte. Sin embargo, en celulosas regeneradas, la distribución de la longitud molecular por lo general es posesionada por el valor crítico: ésta es una razón por la que la resistencia de una fibra de rayón tiende a ser menor que la de una fibra natural con un grado similar de orientación, aunque en algunos de los rayones la resistencia se incremente por el mejoramiento en la distribución de la longitud molecular.

Otro factor determinante de la resistencia es la acción de la carga entre las moléculas, un espécimen compuesto de efectos sobre la escala molecular. Si la escala tiene una distribución irregular, como un resultado del arreglo molecular, una descomposición ocurrirá más pronto que si tiene una acción más uniforme.

La influencia del agua es interesante. Reduce el número de interacciones entre moléculas, y se obtienen deslizamientos más fáciles. Una reducción en la resistencia propia a ésta causa se encuentra en la celulosa regenerada y en muchas otras fibras. También se tienen efectos de hacer posible una mayor acción uniforme de la carga entre las moléculas. Ésta es la razón por la cual la resistencia del algodón y otras celulosas de fibra natural se incrementan con la humedad, y confirma que la longitud de las moléculas es rota, no se deslizan en éstas fibras.

En torsión, las fuerzas concernientes son de ángulos rectos hacia el eje de las fibras; en otras palabras actúan entre las moléculas; no a lo largo de su longitud como se hace cuando una fibra es orientada, es resistente. La deformación en ésta parte es mucho más fácil, justo como es más sencillo al torcer un montón de fibrillas que hacen que tengan resistencia. En consecuencia, el módulo de cizalladura deberá ser menor que el módulo tensil, la diferencia se incrementará más en una mayor orientación de las fibras.

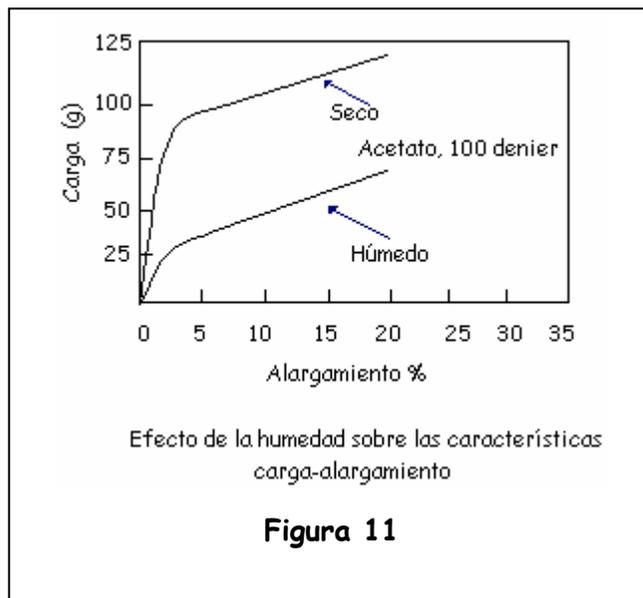
El agua tiene un gran efecto sobre las fuerzas intermoleculares y no es sorprendente que tenga una fuerte influencia sobre la rigidez de la fibra.

4.3 ALGUNOS FACTORES QUE AFECTAN LAS PROPIEDADES TENSILES DE LOS TEXTILES

Índice de carga y tiempo de rompimiento del espécimen. Una prueba rápida es producida a una mayor carga de rompimiento que una prueba lenta. Una relación empírica se estableció entre los valores de alargamiento obtenidos y el tiempo que toma en romper el espécimen. Dado que esta relación aparece al aplicarse a hilos y, telas también como a fibras, es evidente para mostrar como las propiedades del hilo y la tela dependen de manera principal de las propiedades de la fibra.

Capacidad de la máquina. Si un espécimen débil es analizado sobre una máquina de alta capacidad el tiempo para romperse será corto, y por lo tanto el resultado del alargamiento óptimo no será producido. La capacidad de la máquina será elegida al tiempo requerido para romper el espécimen que sea cercano al tiempo requerido.

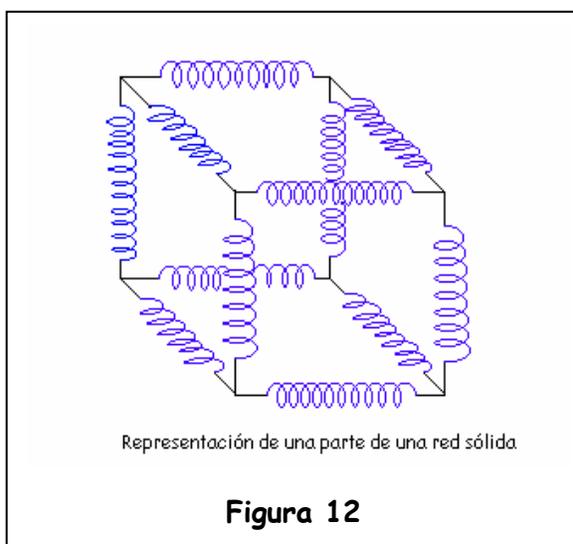
Efectos de la temperatura y la humedad. El comportamiento mecánico de las fibras textiles y la estructura de la fibra esta influenciada por la cantidad de humedad en el espécimen. La relación de humedad de varios tipos diferentes de fibras y la naturaleza del grado a la cual las propiedades de las fibras son modificadas varía. La curva carga-desplazamiento de un



material hidrófobo tal como el Terylene cuando se analiza en un estado seco será similar a la curva obtenida cuando se analiza el rayón acetato en seco, y en húmedo exhibirá diferencias significantes. (Ver figura 11)

Para el análisis rutinario es esencial que las pruebas a atmósfera estándar se mantengan en el laboratorio. Incluso aunque las pruebas de laboratorio pueden tener una atmósfera controlada, no es buena práctica tomar un muestreo e inmediatamente empezar su análisis. Es necesario esperar el tiempo suficiente para que las muestras lleguen a su equilibrio. El tiempo requerido variará y dependerá de la forma en la cual el material está disponible.

4.4 ELASTICIDAD



La rigidez de los llamados cuerpos rígidos es en realidad una ilusión. Los sólidos están compuestos de átomos que no están en contacto rígido. Los átomos no tienen superficies duras que puedan compactarse; sus nubes de electrones pueden ser moldeadas o deformadas por fuerzas externas. En un sólido los átomos están unidos entre sí por fuerzas que se

comportan de modo muy parecido a las fuerzas de los resortes. En la **figura 12** se muestra una representación de una parte de una red sólida, que es la ordenación regular de los átomos como los podríamos encontrar en un cristal. Cada átomo está en equilibrio bajo la influencia de los seis resortes que lo rodean; las constantes efectivas de los resortes son muy grandes, de modo que se necesita una gran fuerza

para cambiar la separación. Esto se debe a la idea de rigidez que percibimos. En otros sólidos, los átomos pueden estar ordenados en filas largas más bien que en redes cúbicas; estos materiales no son tan rígidos, como no lo es, por ejemplo, el hule. Cuando estiramos un material así, aplicamos la fuerza suficiente para cambiar los espacios atómicos.

El esfuerzo y La deformación tienen una constante de proporcionalidad que es llamado módulo de elasticidad

Esfuerzo = módulo x deformación (ec. 9)

Si la primera parte de la curva tensión-deformación es lineal, tiene aplicación la ecuación anterior, con un módulo constante correspondiente a la porción lineal de la gráfica. Al continuar creciendo el esfuerzo, la relación tensión-deformación puede ser no lineal, pero si el material permanece elástico: es decir, si se retira el esfuerzo, la muestra retorna a sus dimensiones originales.

Si el esfuerzo aumenta más allá del límite de cedencia o límite elástico del material, la muestra sufre un cambio permanente y no recupera sus dimensiones originales cuando se haya retirado el esfuerzo; esta clase de comportamiento se llama plasticidad. Más allá de la elasticidad o cedencia sucede la rotura, la cual se da tras un esfuerzo llamado resistencia a la rotura o resistencia final.

Elasticidad-plasticidad. Definiendo la elasticidad, como la aptitud a las deformaciones reversibles, y la plasticidad, como la aptitud a las deformaciones irreversibles. Hacemos la diferencia entre elasticidad inmediata y elasticidad diferida

Elasticidad inmediata y diferida. Esta reversibilidad es otra función del tiempo., es preciso un plazo para que sea total; por tal motivo es necesario distinguir la elasticidad inmediata (o instantánea) de la elasticidad diferida (o retardada).

Incluso la elasticidad "inmediata" está ligada a un cierto plazo; en la práctica; En el textil se considera como elasticidad inmediata, la que corresponde a una reversibilidad efectuada en una duración del orden de un segundo.

En práctica, las deformaciones elásticas se componen de una parte "inmediata reversible" y una parte de "reversibilidad diferida"; se habla de "retornos" (o de "restauraciones") inmediata y diferida.

En el campo textil, el comportamiento verdadero Hookeano es raro y sólo tiene relación con una zona muy restringida de desplazamiento. Sin embargo, el principio de las curvas Esfuerzo-deformación comprende una parte rectilínea que corresponde a una elasticidad casi inmediata: Es la zona hookeana en la que la fuerza de tracción y la elongación están en relación directa de proporcionalidad. Es esta parte la que corresponde también a la definición del módulo inicial.

4.5 CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO

Tipos de fluidos

Fluido en movimiento:

Fluidos ideales

Fluidos reales { Fluidos newtonianos
Fluidos no newtonianos.

Un fluido ideal es uniforme y laminar; tiene una velocidad constante y por lo tanto una dirección y sentido constantes, tiene incompresibilidad (densidad constante), no es viscoso, no es rotacional.

Dentro de los fluidos reales están contemplados el fluido newtoniano y el fluido no newtoniano y los dos tienen la característica de que son viscosos.

Como los materiales textiles son polímeros semicristalinos, tienen una dualidad.

- Moléculas bien ordenadas (cristales)
- Moléculas sin forma propia (se puede moldear); Sin forma (amorfa).

La parte cristalina tiene una dirección longitudinal; la parte amorfa aunque no es un sólido verdadero, si tiene un orden, tiene una dirección radial que es lo que le da volumen.

La región interfase se encuentra entre la parte cristalina y la parte no cristalina y, es muy pequeña. La fibra tiene una subestructura que esta conformada de:

- Fibrillas
- Microfibrillas (laminillas)
- Protofibrillas

Todos los materiales textiles son porosos (tienen cavidades y fallas). La porosidad se ha demostrado por adsorción de gases, por difusión de RX, por microscopio electrónico. Se detectan poros de $1,600 \text{ \AA}$ a 2 \AA ; $\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$

Hay microfibrillas que se introducen en los poros y por lo tanto hay una dislocación. Las moléculas no sólidas se están asociando pero tienen o están constituidas de poliedros regulares, o de poliedros irregulares. Hay orden pero no forma.

La parte cristalina o reticular tiene una fuerza de cohesión muy grande (en donde se encuentra la parte hookeana). La parte cristalina cede a la parte no cristalina por consiguiente a la parte plástica, hasta llegar al punto de rompimiento. La fuerza de cohesión no es uniforme, cambia en forma longitudinal o, en forma radial.

La orientación longitudinal se da por la fuerza de cohesión, tiene enlaces de covalencia. En una parte radial hay enlaces de tipo secundario (puentes de hidrógeno, de Van Der Waals), están en la parte de la piel y esto da la cohesión de un No sólido; ésta fuerza de cohesión se maximiza, por lo tanto, la distancia entre cadenas moleculares es mínima.

En la interfase existe la mayor parte de fallas, huecos, o dislocaciones.

En la región amorfa imperan las leyes de la termodinámica (leyes de orden-desorden), también interviene mucho la temperatura. Si se quiere que se modifiquen los enlaces en la parte amorfa, se da un efecto plastificante.

En la mayoría de los materiales la elasticidad y la viscosidad son apreciables. Si esto no es apreciable de forma independiente, tales materiales son viscoelásticos.

4.6 VISCOSIDAD

Es la medida de la resistencia a fluir que ofrece un fluido cuando está sometido a un esfuerzo de una fuerza de cizalladura. Para un fluido newtoniano, la fuerza, F , necesaria para mantener un gradiente de velocidad dv/dx entre planos adyacentes de un fluido de área A está dada por: $F = hA (dv/dx)$, donde h es una constante, llamada el coeficiente de viscosidad. En unidades SI tiene unidades de pascal por segundo (en el sistema c.g.s es medida en poises). Los fluidos no newtonianos no se comportan según este modelo sencillo.

4.7 FLUIDOS NEWTONIANOS

Fluido en el que el gradiente de velocidad es directamente proporcional al esfuerzo de cizalladura. Si dos placas planas de área A están separadas por una capa de fluido de espesor d y se mueven una respecto a la otra con una velocidad v , entonces el ritmo de cizalladura es v/d y el esfuerzo de cizalladura es $F/A = (\mu v)/d$, donde μ es una constante de proporcionalidad llamada la viscosidad newtoniana. Muchos líquidos son fluidos newtonianos en un amplio rango de temperaturas y presiones. Sin embargo, otros no; éstos son denominados fluidos no newtonianos.

4.8 FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Los fluidos en los cuales el esfuerzo de corte no es directamente proporcional a la relación de deformación son no newtonianos. Estrictamente hablando la definición de un fluido es válida solo para materiales que tienen un esfuerzo de deformación cero. Por lo común, los fluidos no newtonianos se clasifican con respecto a su

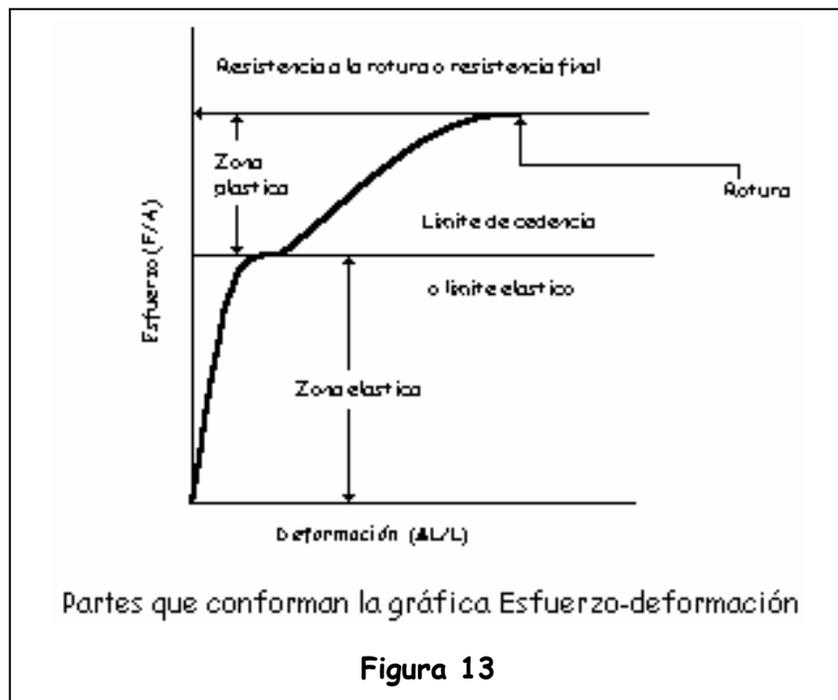
comportamiento en el tiempo, es decir, pueden ser dependientes del tiempo o independientes del mismo.

La mayor parte de los fluidos no newtonianos tienen viscosidades aparentes que son por lo general altas en comparación con la viscosidad del agua.

Después de la deformación algunos materiales regresan parcialmente a su forma original cuando se libera el esfuerzo aplicado. A tales fluidos se les llama viscoelásticos.

4.9 TENSIÓN Y COMPRESIÓN

Para un estiramiento o una compresión simples, el esfuerzo se define como F/A , la fuerza dividida por el área sobre la que actúa, y la deformación se define como la cantidad sin dimensiones $\Delta L/L$, la fracción de cambio de longitud de la muestra.



El módulo de los esfuerzos de tensión y de compresión se llama Módulo de Young, y en la práctica de la ingeniería se representa mediante el símbolo **E**. Por lo que la ecuación (8) se convierte en:

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{ec. 10})$$

Aunque el módulo puede ser el mismo tanto para la compresión como para la tensión, la resistencia a la rotura puede ser distinta en ambos casos. Por ejemplo, el concreto es muy resistente a la compresión, pero tan débil a la tensión que casi nunca se usa de esta manera en la práctica de la ingeniería.

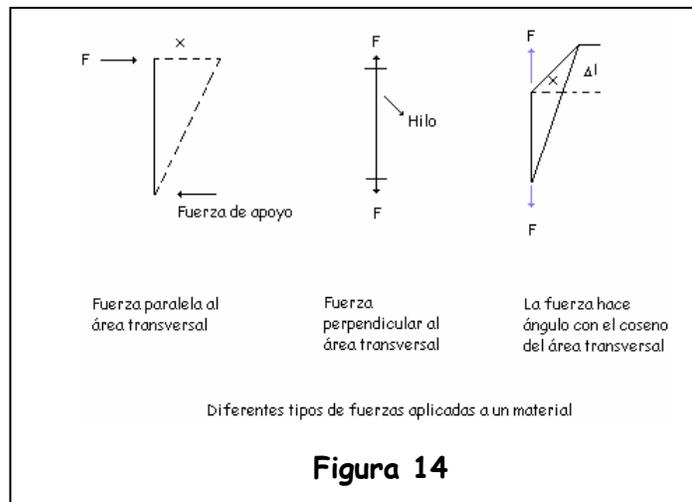
A continuación se muestran en la **figura 14** los diferentes tipos de fuerza aplicadas a un material.

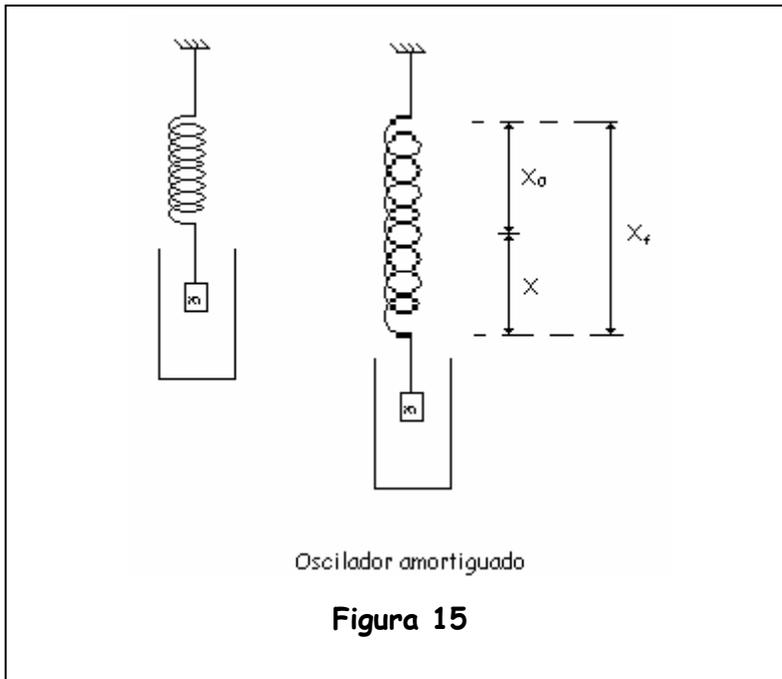
Si la fuerza es paralela al área transversal el esfuerzo es cortante y la deformación es desplazamiento.

Si la fuerza es perpendicular al área transversal el esfuerzo de tensión da una deformación longitudinal.

Si la fuerza forma un ángulo con el área transversal se dan las dos anteriores

Un fluido no responde a esfuerzos cortantes; sin embargo si responde a efectos de elasticidad.





Para el movimiento real de un fluido lo ejemplificamos con un oscilador amortiguado, mostrado en la **figura 15**.

En la viscoelásticidad la aplicación de esfuerzos resulta en una deformación elástica instantánea seguida por una deformación viscosa

dependiente del tiempo. En la naturaleza del comportamiento viscoelástico existen dos tipos de desviaciones importantes.

Anomalías en el esfuerzo. La deformación (sólido) o su tasa (líquido) pueden no ser proporcionales al esfuerzo, pudiendo depender de él de una forma complicada. Ésta anomalía es común cuando el límite elástico es excedido por un sólido.

Anomalías en el tiempo. Se debe a que el esfuerzo puede depender en conjunto de la deformación y su tasa, tanto como de variaciones en el tiempo de ella. Estas anomalías reflejan su comportamiento que combina características sólidas y líquidas, por lo que, los materiales que actúan de ésta forma son llamados viscoelásticos.

4.10 VISCOELASTICIDAD

Los materiales viscoelásticos son aquellos que presentan un comportamiento dual. Esto significa que el material posee una componente elástica (como sí fuera un sólido) y una componente de flujo

Ciencia que estudia los sólidos deformables cuyo comportamiento es viscoelástico. Un material es viscoelástico cuando es viscoso pero al mismo tiempo presenta determinadas propiedades elásticas, con la capacidad para almacenar energía de deformación elástica y el aumento lento y progresivo de la deformación hasta un valor límite de equilibrio, cuando es sometido a tracción.

Los materiales termoplásticos presentan un comportamiento elástico completo a temperaturas por debajo de su temperatura de transición vítrea T_g (indicativo de la temperatura de calentamiento que en los polímeros produce un cambio en la rigidez o módulo del material), y son fluidos viscosos por encima de su temperatura de fusión T_m . Entre estos dos límites de temperatura muestran un comportamiento viscoelástico, parte de la respuesta a una tensión es la deformación elástica, parte es una deformación elástica diferida y parte es una deformación no recuperable debida a un flujo viscoso.

La fluencia es una deformación con el tiempo bajo una tensión constante y el efecto complementario es la relajación.

El comportamiento mecánico de las fibras es viscoelástico y prácticamente la investigación producida en ésta área se encuentra publicada entre los años cincuenta y los años noventa, incluyendo los primeros trabajos de Meredith (1956) hasta los

trabajos más reciente de Vangheluwe (1993), pasando por la recopilación de varios autores realizada por Morton y Herale (1976).

Todo sistema mecánico obedece a una ecuación fundamental que establece una relación entre las respuestas dinámicas producto del movimiento y la cinética que describe este movimiento. Dicha relación también existe en reología, entre una deformación y la tensión aplicada, relación que depende de las propiedades y de la naturaleza del material.

El comportamiento elástico puede ser modelado por un resorte el cual almacena energía a través de su propia deformación que es liberada después. El comportamiento viscoso se modela mediante el uso de un amortiguador que posee un pistón moviéndose en un líquido viscoso.

La elasticidad de un material se refiere a la habilidad del mismo a almacenar la energía de deformación y recuperar su configuración original luego que la fuerza responsable por la deformación sea removida. Por otra parte la viscosidad de un material se refiere a la habilidad que posee el mismo para disipar o perder la energía de deformación a través de su fluencia. Los materiales que exhiben ambos comportamientos se clasifican como materiales viscoelásticos. Cuando un material viscoelástico es sometido a una deformación una porción de la energía de deformación es almacenada, mientras que el resto es perdido en forma de flujo. Cuando la fuerza responsable de la deformación es removida la energía elástica almacenada se reintegra de forma completa.

4.11 ELEMENTOS COSNTITUTIVOS

Una teoría clásica de elasticidad relativa a las propiedades mecánicas de los sólidos elásticos, está con la ley de Hooke, donde una fuerza es siempre directamente proporcional al alargamiento e independiente de la velocidad de deformación y de su historial, en pequeñas deformaciones. Una teoría clásica de hidrodinámica relativa a las propiedades de líquidos viscosos está de acuerdo con la ley de Newton, donde una fuerza es siempre directamente proporcional a la velocidad de deformación e independiente del alargamiento.

Elementos básicos:

Muelle.- Corresponde a deformaciones de Hooke. De ella se puede concluir lo siguiente:

- Cuando se aplica una fuerza (σ), ocurre una deformación instantánea ε proporcional a la fuerza aplicada. Cuando cesa dicha fuerza la deformación se anula de inmediato, es decir, es una deformación elástica instantánea y recuperable.
- Del mismo modo, para un material representado por una barra, sustituimos una extensión (ε) por un alargamiento (γ).

Para un material con comportamiento elástico lineal, se cumple la siguiente expresión:

$$\sigma = M * \gamma \quad (\text{ec. 11})$$

Mientras que para un comportamiento elástico no lineal le corresponde una expresión como la siguiente:

$$\sigma = M * \gamma^c \quad (\text{ec. 12})$$

En donde el exponente puede adquirir cualquier valor, como en el caso del modelo de Vangheluwe que más tarde definiremos toma el valor de 2.

Émbolo.- Dicho émbolo se encuentra en condiciones ideales, es decir, el pistón se desliza en el interior de éste a través de un fluido. Par mover el pistón se requiere de una fuerza **F**. Cuanto mayor se ésta, más rápidamente se moverá el pistón. Si esta relación es lineal, entonces tenemos:

$$F = \eta \frac{dx}{dt} \quad (\text{ec. 13})$$

Una deformación similar ocurre en ciertos materiales, como en el caso de la barra. Cuando se aplica una carga a la barra, ésta sufre una extensión más no un alargamiento, que es proporcional a la fuerza e igual al gradiente de velocidad. Otros aspectos relevantes del comportamiento de este tipo de materiales son:

- El líquido viscoso Newtoniano cumple todas las acciones que se señalaron anteriormente.
- Si el esfuerzo al que esta sometido se mantiene durante un instante, la deformación es constante e igual al valor para este instante. Entonces la deformación es irre recuperable.
- El comportamiento es de un fluido, es decir, cuando es sometido a una fuerza constante, la deformación crece linealmente en el tiempo y el material fluye indefinidamente.

La ecuación reológica del fluido viscoso es precisamente la ecuación de Newton:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{F(t)}{\eta} \quad (\text{ec. 14})$$

Equivalente a

$$F = \eta \frac{dx}{dt} \quad (\text{ec. 15})$$

Ecuación que integrando resulta

$$x(t) = \frac{1}{\eta} \int_0^t F(t) dt \quad (\text{ec. 16})$$

Sistema de muelle-émbolo.- Si ambos elementos son colocados en serie, a este arreglo se le conoce como el elemento de Maxwell, y representa una deformación elástica instantánea al aplicar una carga, continuando con una deformación no recuperable a una razón constante. Si por el contrario la colocación es en paralelo, a este arreglo se le conoce como elemento de Voigh-Kevin y representa una recuperación diferenciada.

4.12 MODELOS ANALÓGICOS CUANTIFICABLES

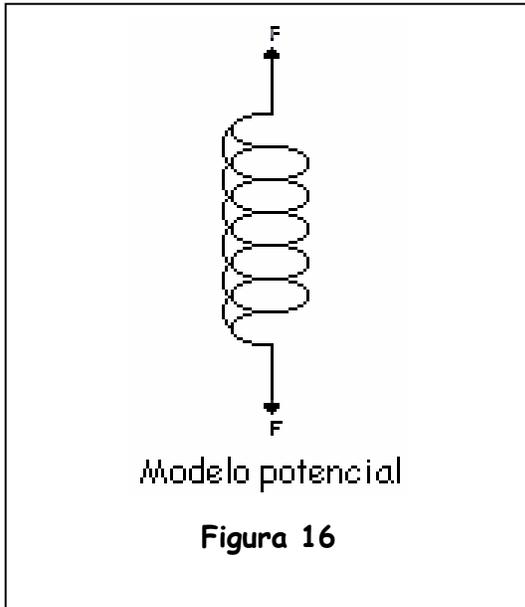
Las fibras consisten principalmente en unidades cristalinas orientadas y exhiben la viscoelasticidad cuantitativamente como los polímeros amorfos. Llega como sorpresa que alguien como J. C. Maxwell, quien es mejor conocido por su trabajo en la electricidad y el magnetismo, contribuyera en las matemáticas de la viscoelasticidad. Cuando estaba usando una fibra de seda, como elemento de recuperación en un artefacto para medir la carga, noto que el material no era perfectamente elástico y que mostraba efectos de tiempo. El modelo que lleva su nombre se propuso para relacionar el comportamiento real de una fibra. Prácticamente la investigación producida en esta área se encuentra publicada entre los años 50 y los años 90 del siglo XX incluyendo los primeros trabajos de Meredith hasta los trabajos mas recientes de Vangheluwe, pasando por las recopilaciones de trabajo de varios autores

realizada por Morton y Hearle. La aplicación de un esfuerzo a un material plástico tiene como primera consecuencia una deformación elástica debida a las deformaciones en las longitudes y ángulos de enlace. Estas deformaciones son reversibles de pequeña magnitud y se cuantifican mediante los parámetros elásticos: modulo de compresión, modulo de rigidez, modulo inicial y relación de Poisson. La relación de Poisson es un parámetro de interés cuyo valor oscila entre 0.5 para los fluidos y 0 para los sólidos elásticos incompresibles.

El comportamiento mecánico de los sólidos elásticos se rige por la ley de Hooke, mientras que el correspondiente a los fluidos viscosos por la ley de Newton para cualquier grado de deformación. Sin embargo todos los sólidos reales manifiestan en su comportamiento mecánico un efecto viscoso y todos los fluidos reales un efecto elástico. La combinación de ambos efectos se conoce como viscoelasticidad, la cual esta presente con mayor o menor énfasis en todos los sólidos y fluidos reales. La viscoelasticidad es la propiedad distintiva de los materiales plásticos y se define por una respuesta compleja del comportamiento mecánico fuertemente dependiente del tiempo. La fluencia lenta y la relajación de la tensión son sus características.

El comportamiento viscoelástico es interpretable sobre la base de la dinámica molecular; las deformaciones de enlaces y las deformaciones reversibles junto con los deslizamientos moleculares que se producen a grandes deformaciones explican las recuperaciones, los tiempos de relajación y las deformaciones permanentes que se observan en los polímeros.

4.13 MODELO POTENCIAL



Es el modelo más simple y está constituido por un único elemento de Hooke; como se ilustra en la **figura 16**. El modelo potencial cumple la función:

$$\sigma = A\gamma^B \quad (\text{ec. 17})$$

Donde:

σ es la tensión aplicada sobre el elemento de Hooke

γ es la deformación que experimenta dicho elemento al someterse a tensión

A es el módulo del elemento de Hooke, y

B nos indica la desviación de la linealidad de la deformación

La estimación inicial de **a** y **b** de este modelo se obtiene mediante mínimos cuadrados aplicados sobre la nube de puntos experimental que define la curva carga alargamiento del textil en estudio

4.14 MODELO DE MAXWELL

El modelo de Maxwell consiste en un elemento de Hooke dispuesto en serie con un elemento de Newton, como se ilustra en la **figura 17**; representa a un material que puede responder elásticamente a una tensión aplicada, pero que también presenta posteriormente flujo viscoso, en este modelo las dos contribuciones de deformación son aditivas.

Si el desplazamiento del elemento de Hooke es γ_1 y el correspondiente al elemento de Newton es x_2 , entonces el desplazamiento total de dicho sistema será x :

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (\text{ec. 18})$$

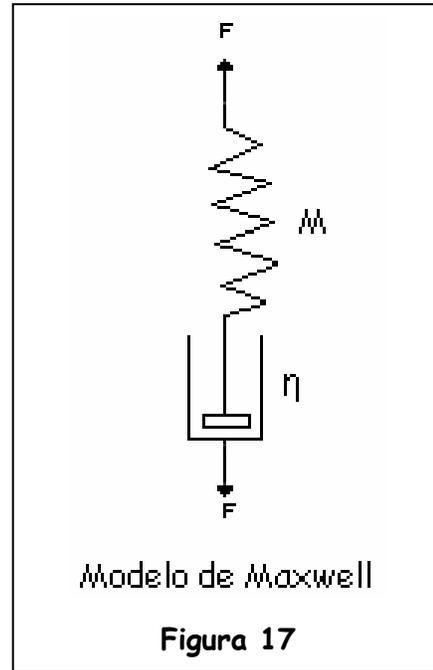
El elemento de Hooke al estar colocado en serie soporta la misma tensión que el elemento de Newton por lo que:

$$\sigma = E \gamma_1 \quad (\text{ec. 19})$$

Y también

$$\sigma = \eta \left(\frac{d\gamma_2}{dt} \right) \quad (\text{ec. 20})$$

Para resolver la ecuación, se aplican las transformadas de Carson (variables seguida por la letra **c**) en el que las derivadas se transforman multiplicando por una variable auxiliar **p**, entonces las ecuaciones anteriores resultan



$$\sigma_c = E \gamma_1 c \quad (\text{ec. 21})$$

$$\sigma_c = \eta p \gamma_2 c \quad (\text{ec. 22})$$

La igualdad en la suma de desplazamientos se mantiene también con las transformadas, por lo tanto:

$$\sigma_c = \gamma_1 c + \gamma_2 c = \sigma_c \left[\frac{1}{E} + \frac{1}{(p\eta)} \right] \quad (\text{ec. 23})$$

De aquí resulta

$$yc = \left[\frac{p\eta E}{p\eta + E} \right] xc \quad (\text{ec. 24})$$

Realizando la transformada inversa resulta

$$y = E x \exp \left[\frac{-E}{(r\eta)} x \right] \quad (\text{ec. 25})$$

Es decir

$$y = A x \exp(-B x) \quad (\text{ec. 26})$$

La estimación de los parámetros **A** y **B** se obtienen aplicando mínimos cuadrados sobre la ecuación logaritimizada.

$$\frac{y}{x} = A \exp(-b x) \quad (\text{ec. 27})$$

Evidentemente al despejar el exponente de la expresión y aplicar logaritmos a ambos lados resulta que:

$$\log\left(\frac{y}{x}\right) = \log A - Bx \quad (\text{ec. 28})$$

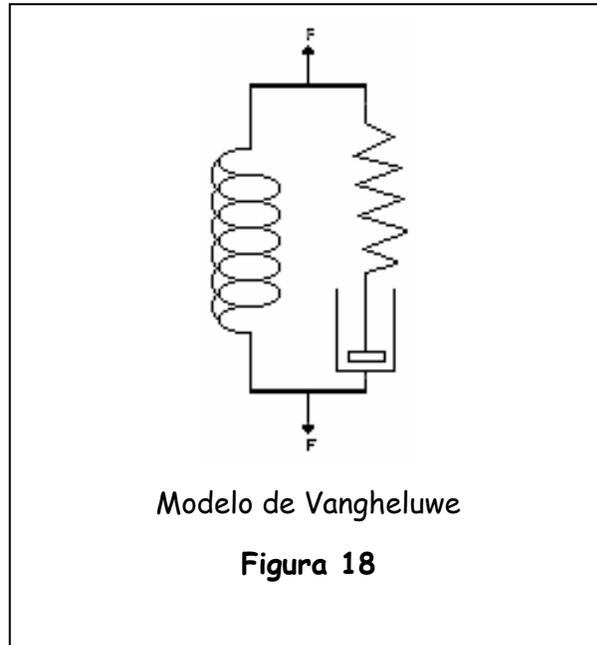
4.15 MODELO DE MAXWELL MODIFICADO

La diferencia entre el modelo descrito anteriormente y el modelo modificado del mismo nombre, es que en el primero el elemento de Hooke es proporcional a la deformación x . Mientras que en el segundo dicha función de deformación es potencial x^c . Por ello, el modelo resulta el mismo salvo que la variable x del primer modelo es sustituido por x^c en el modificado. Los estimadores iniciales de **A** y **B** son los mismos que en el modelo de Maxwell, pero adicionalmente se deberá de considerar el estimador del exponente **c** que debido a la linealidad de la deformación entonces partida de uno.

$$y = Ax^c \exp(-Bx^c) \quad (\text{ec. 29})$$

4.16 MODELO DE VANGHELUWE

Uno de los modelos más sustentables y recientes es el modelo de Vangheluwe que está constituido por un elemento de Maxwell colocado en paralelo con un muelle no lineal de módulo C . En la **figura 18** se representa el modelo de Vangheluwe. La relación entre la carga (σ) y el alargamiento (γ) se rige por la ecuación (29):



$$\sigma = A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 \quad (\text{ec. 30})$$

Donde:

A es la tenacidad en la fluencia, $A = \eta r$, siendo r la razón de deformación.

B es el cociente de la inversa del tiempo de relajación del elemento de Maxwell y la razón de deformación, y

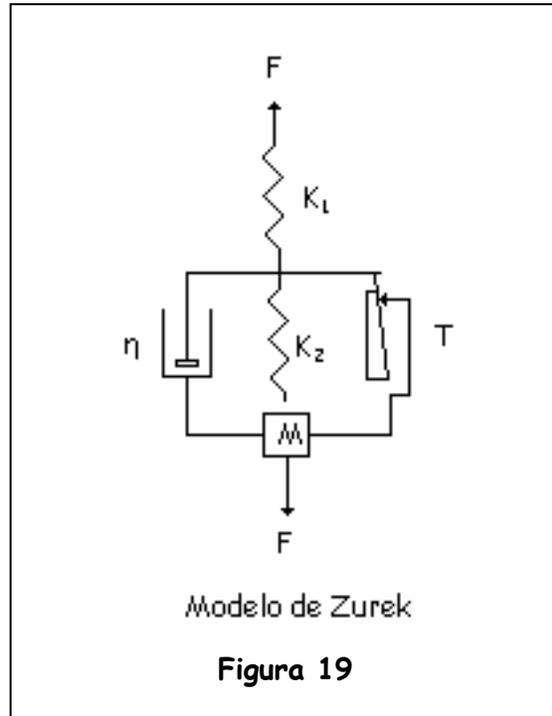
C es el módulo del muelle no lineal.

Asimismo, estos parámetros tienen una relación directa con las propiedades mecánicas y tintóreas.

4.17 MODELO DE ZUREK

El modelo de Zurek consiste de un elemento de fricción T con una masa de inercia M , en paralelo con un elemento formado por el resorte de Hooke K_2 y un embolo de Newton de viscosidad η_2 todos colocados en serie con otro resorte de Hooke K_1 .

El modelo es descrito de forma matemática por la modificación de la ecuación de Kelvin-Voigt los cuales trabajaron con la siguiente expresión:



$$\sigma = A\gamma + B + (B - C\gamma)e^{-u\gamma}$$

(ec. 31)

5. JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta que muchos de los problemas presentados en la industria textil, en específico en una tela acabada en la que, podemos encontrar defectos no detectados a tiempo, consideramos que es necesario un análisis cualitativo en los hilos utilizados para fabricar tales telas que nos permitan prevenir problemas en tejido, tintura o acabado; hacemos uso de algunos modelos viscoelásticos para estudiar el comportamiento mecánico de algunos hilos.

Puesto que un estudio de las propiedades de los hilos es de gran importancia; y, como la forma de la curva tensión-deformación de un hilo nos proporciona propiedades mecánicas de tales hilos, teniendo en cuenta lo anterior consideramos que es conveniente analizar mediante las curvas carga específica-alargamiento tales propiedades como una aportación al mejor entendimiento del comportamiento mecánico de los hilos.

La utilización de algunos modelos viscoelásticos para el estudio de las propiedades mecánicas en los hilos se emplean en éste trabajo a efecto de la comprensión de tal comportamiento, puesto que, otros métodos tales como; Resonancia magnético, porción de Yodo, solubilidad diferencial por mencionar algunos elevarían mucho el costo de un análisis en cuanto al comportamiento mecánico del material textil aquí expuesto.

En líneas generales, una forma de estudiar y definir una ley matemática del comportamiento viscoelástico es a partir de modelos analógicos cuantificables que nos permiten extraer magnitudes cuantitativas que le caracterizan, donde la componente elástica se representa por un elemento de Hooke y por su comportamiento estaría

relacionado con la respuesta instantánea al esfuerzo recibido por la variación de las dimensiones que serían recobradas totalmente al cesar el esfuerzo. El elemento de Newton explicaría la variación de dimensiones sin recuperación que se producen a lo largo del tiempo en un material, ya sea durante la aplicación del esfuerzo o bien después de cesar el mismo, y estaría relacionado con las tensiones internas acumuladas en el material, que se liberan gradualmente. Existen diversos modelos analógicos constituidos por los elementos de Hooke y Newton colocados en serie o en paralelo. La combinación de estos elementos puede efectuarse como en los modelos de Vangheluwe, Zurek etc.

6. OBJETIVO

Los objetivos del presente trabajo fueron:

- Simular el comportamiento viscoelástico de los hilos sometidos a elevadas deformaciones utilizando modelos analógicos como el Maxwell, Maxwell modificado, Vangheluwe, Vangheluwe modificado (cuatro y cinco variables) y finalmente el modelo de Zurek.
- Estudiar las propiedades mecánicas de estos hilos y su relación con la simulación viscoelásticas.
- Manipular modelos con respuesta más amplia y utilizarlos para buscar mejores respuestas estructurales de los hilos en estudio.
- El comportamiento mecánico de los hilos textiles y su simulación con elementos y modelos mecánicos si se utilizan adecuadamente son fuente importante de aportación de información, en beneficio de mejoras en la línea de producción y en el producto mismo.

7. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este trabajo se utilizaron hilos de diversos sistemas de hilatura, como se indica en la tabla 1.

Tabla 1 Hilos textiles considerados en el estudio

No.	Material	Título (tex)
1	Algodón 100%	31.26
2	Algodón 100%	18.8
3	Algodón 100%	24.09
4	Poliéster/algodón 50/50%	26.01
5	Poliéster/algodón 65/35%	12.21
6	Poliéster/algodón 65/35%	19.79
7	Algodón/elastano 95/5%	25
8	Algodón/elastano 96/4%	25
9	Algodón/elastano 94/6%	25
10	Poliéster 100% (fibra corta)	20.27
11	Poliéster 100% (fibra corta)	19.54
12	Poliéster 100% (filamento)	15.53
13	Poliéster 100% (texturizado)	18.22
14	Poliéster 100% (tangleado)	36.79
15	Polinósica 100%	22.5
16	Tencel 100%	20.79
17	Fibraza mate 100%	21.37
18	Rayón 100%	33.89
19	Acrílico 100%	39.32
20	Nylon 100%	8.67

7.1 MATERIALES

En la **tabla 2** se muestran las propiedades mecánicas de los hilos estudiados en éste trabajo, dichas propiedades fueron las obtenidas en las pruebas dinamométricas realizadas en un Statimat.

Tabla 2 Propiedades mecánicas de los hilos textiles considerados en el estudio

Muestra No.	Título (tex)	Fuerza (cN)	Alargamiento (%)	Trabajo de rotura (cN.cm)	Módulo de elasticidad (cN/tex)	Tenacidad al punto de rotura (cN/tex)
1	31.26	462.64	6.26	753.39	290.4	14.52
2	18.8	310.19	5.37	444.11	256.65	16.5
3	24.09	361.28	5.54	520.6	252.24	15
4	26.01	267.5	10.99	921.9	185.07	10.29
5	12.21	247.9	8.81	564.9	253.88	20.3
6	19.79	448.88	10.36	1163.67	222.3	22.68
7	25	255.01	6.82	199.79	139.24	10.2
8	25	252.33	7.83	223.51	103.38	10.09
9	25	222.02	6.44	116.41	77.94	8.88
10	20.27	401.25	18	2049.61	275.62	19.79
11	19.54	618.16	13.23	1737.88	281.79	31.63
12	15.53	321.22	30.96	3745.38	288.56	20.69
13	18.22	646.74	21.65	4108.54	360.23	35.49
14	36.79	1158.92	36.34	14380.09	124.35	31.5
15	22.5	498.19	8.15	1151.71	425.92	22.14
16	20.79	506.34	8.49	1247.49	204.47	24.35
17	21.37	323.26	12.83	1262.27	275.85	15.13
18	33.89	605.39	20.75	3988.08	340.38	17.87
19	39.32	508.39	22.05	3588.24	183.24	12.93
20	8.67	386.9	23.45	2435.62	227	31.26

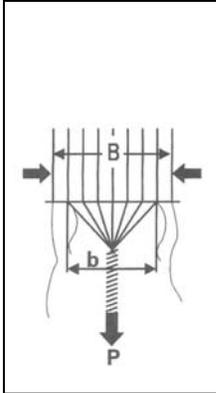
7.2 SISTEMAS DE HILATURA

Hilatura por compactación

El efecto de compacidad se consigue por la condensación dinámica de las fibras a la salida del tren de estirajes, básicamente minimizando la influencia de las fibras marginales del "triángulo" de torsión, consiguiendo una estructura homogénea del hilo que no sólo contribuye a la reducción de vellosidad sino a su resistencia y aspecto más cilíndrico, en definitiva al estándar de calidad.

El sistema de hilatura por compactación o condensación no difiere mucho del que en la actualidad se utiliza para obtener hilos cardados o peinados en continuas de hilar de anillos. Es adecuado para todas las fibras de corte algodónero y de corte lanero, ya sean fibras naturales, fibras químicas o sus mezclas. Se aplica también con buenos resultados a la obtención de hilos finos a base de microfibras. No se han detectado limitaciones en cuanto al número del hilo a obtener. Hay que adecuar los órganos operativos de la continua de anillos al grosor del hilo a fabricar, al igual que en la continua convencional. En la hilatura por compactación se modifica el tren de estirado de la continua de hilar para reducir el triángulo de hilatura, integrando mejor las fibras emergentes en el núcleo del hilo. En la **figura 20** puede verse que la anchura **B** del triángulo de hilatura depende, esencialmente, del número del hilo, de la torsión de la mecha y del estirado.

Continúa de anillos convencional



Hilatura por compactación

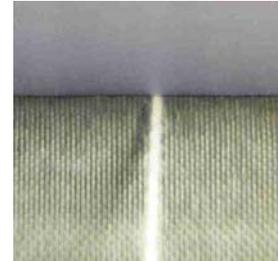
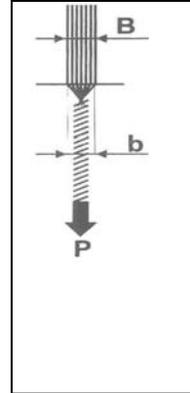


Figura 20 Comparación del triángulo de hilatura del hilo convencional y compactado

Un aumento de la masa lineal del hilo y del estirado implica una mayor anchura **B**. Las mechas más torcidas reducen **B**, aunque conviene regular muy bien el grado de torsión de la mecha si queremos obtener hilos regulares de masa. En la actualidad, por razones de rentabilidad industrial, conviene trabajar con estirados altos en la continua de hilar.

La hilatura por compactación recupera el aspecto y propiedades de los hilos obtenidos con bajos estirados en la continua de hilar pero permite fabricarlos con estirados altos y a elevadas velocidades. Al aumentar la tensión **P** (**figura 20**) se reduce el ancho **b**, que siempre es menor que la anchura **B**. Esta diferencia de anchura provoca, en la hilatura de anillos convencional, que algunas fibras no estén retenidas por la torsión, reduciendo la resistencia a la rotura por tracción y aumentando la vellosidad del hilo obtenido, con importantes repercusiones en la formación de borra en tejeduría y muy en especial en la propensión al pilling de los tejidos.

En la **figura 20** puede apreciarse que los mecanismos de la hilatura por compactación reducen los anchos de la mecha **B** y del triángulo de hilatura **b**.

Se cumple que $B = b$

La Tecnología "Open-End"

Una de las consecuencias de las husadas de pequeño formato es que deben ser trascanadas en el bobinado a una unidad de mayor volumen para facilitar su manufactura. La atractiva posibilidad de que la torsión pudiera estar directamente impartida en dicho proceso de bobinado sería posible si pudiera hacerse desde un plano inicial giratorio, desvinculado del proceso de paralelización del tren estiraje, ya que cuando el plano giratorio está situado entre los dos fijos - tren de estiraje y el de bobinado se produce en efecto de "falsa-torsión".

Sistemas de hilatura neumática

La estructura del hilo Open-End, un núcleo de fibras paralelizadas "zunchadas" por otras exteriores puede obtenerse de forma más fácil que con la turbina centrífuga de Rotor OE, por medio de un sistema neumático MJS (Murata JET Spinner) **figura 21**, en base al efecto de "falsa torsión"; el cual consiste en un conjunto formado por dos "vortex" que generan cada uno de ellos una corriente neumática helicoidal en sentido contrario el uno del otro, que arrastra el flujo de



fibras impartiendo una torsión, la primera de ellas en un sentido y la segunda en sentido contrario de forma que persista un remanente que hace el referido efecto de "zunchado".

La aplicación de la ingeniería de mecánica de fluidos en la hilatura es en realidad innovadora, y de gran simplicidad.



Fotografía de la estructura externa de un hilo universal fabricado a partir de fibras cortas unidas por torsión

Figura 22

En la **figura 22** se muestra la fotografía de la estructura externa del hilo, donde se aprecia la torsión requerida para mantener la cohesión de las fibras de algodón.

Dichos hilos se sometieron al ensayo de tracción en un dinamómetro universal bajo la normativa correspondiente.

En la **figura 23** se muestra una fotografía del aparato.



Dinamómetro universal

Figura 23

7.3 MÉTODOS DE ENSAYO

Estadística descriptiva. La estadística descriptiva permite informar de una forma concisa y rápida los aspectos fundamentales de un conjunto de datos. Esto supone el cálculo de medidas centrales, la cuantificación de la dispersión de los datos alrededor de las mismas, la presentación de los resultados en forma de tablas y gráficos, la presencia de los elementos atípicos, agrupaciones, tendencias, etc.

También permite una representación gráfica de los resultados facilitando así información sobre aspectos fundamentales subyacentes en los mismos; estos procedimientos son capaces de superponer varios gráficos planos sobre el mismo par de ejes, así mismo se puede comparar la tendencia por grupos.

Para realizar los análisis de varianza, utilizamos el modelo ANOVA (Analysis of Variance), el cual descompone la variabilidad total de la variable dependiente en componentes independientes que pueden ser atribuidas a distintas causas (factores e interacciones).

7.3.1 REGRESIÓN LINEAL SIMPLE.

Para conocer lo que distintas variables independientes o explicativas influyen sobre el comportamiento de otras variables dependientes o explicadas, se utilizará regresión lineal.

Se tienen varias muestras donde se observa tanto la variable dependiente como las independientes; la media muestral de la variable dependiente nos da una estimación general de la media poblacional. Se estima una media diferente para cada subpoblación definida a partir de unos valores concretos de las variables independientes.

La regresión lineal simple se basa en dos parámetros, **a** (ordenada en el origen) y **b** (la pendiente), que definen la recta con la que se estiman valores de la variable dependiente (*y*) a partir del valor de la variable independiente (*x*) de la forma:

$$y = a + bx \quad (\text{ec. 32})$$

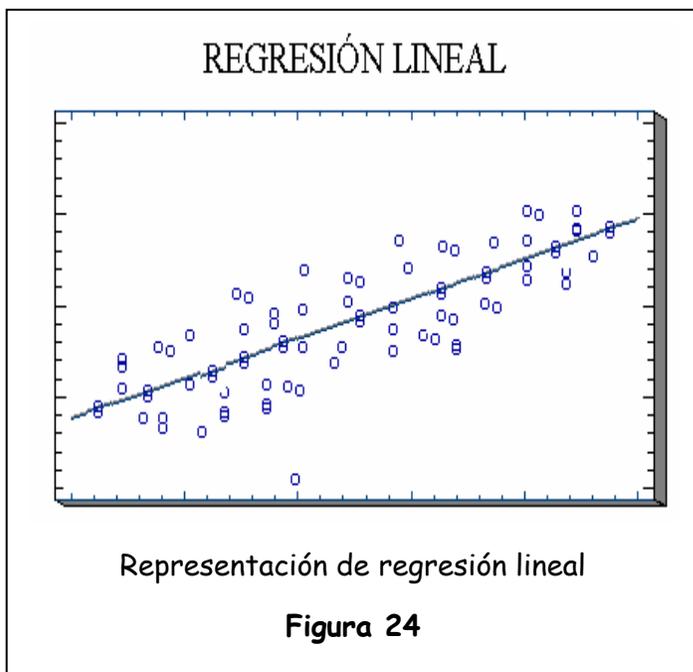
En este caso **a** es el valor que toma la variable dependiente **y**, cuando la variable independiente **x** vale cero, **y** es el punto donde la recta cruza el eje vertical y se obtiene:

$$a = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum xy \sum x}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (\text{ec. 33})$$

En el caso de **b** nos determina la pendiente de la recta, su grado de inclinación y su valor es:

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (\text{ec. 34})$$

Para $i = 1, 2, 3, \dots, n$.



Así mismo la recta será la que mejor se ajuste a la nube de puntos muestrales según el criterio de mínimos cuadrados. El valor así calculado puede ser tomado también como predicción individual del valor de la variable dependiente, y una estimación de la media muestral total si los datos realmente se ajustan al modelo lineal.

7.3.2 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN.

El parámetro que estima el impacto de la correlación entre variables es el coeficiente de correlación, representado por r y su cuadrado el coeficiente de determinación (R^2).

$$\text{Coef. determinación} = \frac{\text{Regresión SS}}{\text{Total SS}} \tag{ec. 35}$$

SS es Suma de cuadrados

$$\text{Regresión SS} = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sum(x-\bar{x})^2} = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x - \frac{\sum x^2}{n}} \tag{ec. 36}$$

$$\text{Total SS} = \sum(y-\bar{y})^2 = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \tag{ec. 37}$$

El valor del coeficiente de correlación toma valores de intervalo que van de 1 a -1, y expresa la relación lineal entre ambas variables y su forma conjunta de variar. Los valores positivos de este coeficiente significan variación simultánea de las variables en este sentido. Así mismo se deduce que los coeficientes de correlación positiva indican que un incremento en el valor de la variable x resulta un incremento en el valor de la variable y , en cuanto a los coeficientes de correlación negativa indican que un incremento en el valor de la variable x resulta una disminución en el valor de la variable y ; un valor de 0, indica que no hay ninguna relación entre las variable x y y .

El coeficiente de correlación lineal se calcula de la siguiente manera:

$$R = \frac{n(\sum xy) - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (\text{ec. 38})$$

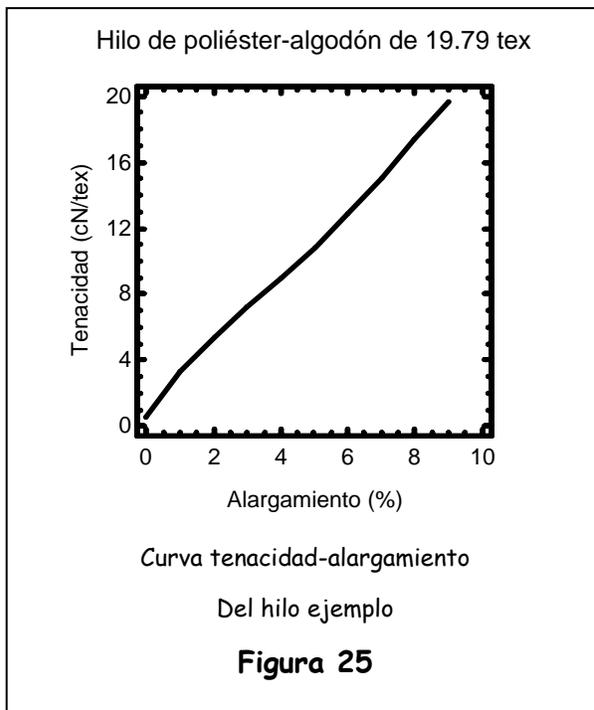
Como se señaló anteriormente los valores que puede tomar el coeficiente de correlación r son: $-1 \leq r \leq 1$.

7.3.3 MUESTREO

Utilizamos un muestreo de 20 hilos textiles, los cuales sometimos a pruebas de dinamometría en un aparato de medición STATIMAT, en los que se realizaron 50 ensayos de cada uno de los hilos.

De este ensayo se obtiene la curva tenacidad-alargamiento a partir del cual se realizó el estudio viscoelástico de los hilos en estudio.

A continuación presentamos un ejemplo: Utilizando un hilo de poliéster/algodón de 19.79 tex (es la masa en gramos de 1000 metros de hilo) obtenidos por un proceso convencional para hilar fibras cortas (algodón)



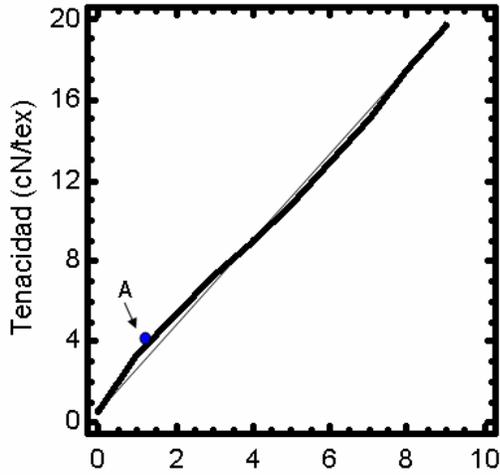
La curva tenacidad-alargamiento de nuestro ejemplo se presenta en la **figura 25** y es la media de 50 curvas individuales, mientras que los datos contenidos en la **tabla 3** fueron leídos de ella.

Tabla 3 Datos leídos de la curva tenacidad vs alargamiento del hilo ejemplo

Alargamiento γ (%)	Tenacidad σ (cN/tex)
0	0.556
1	3.336
2	5.400
3	7.224
4	9.000
5	10.800
6	12.912
7	15.000
8	17.400
9	19.704

Las constantes numéricas del modelo de Vangheluwe se calculan con el método gráfico, ilustrado en las **figura 26, 27, 28**.

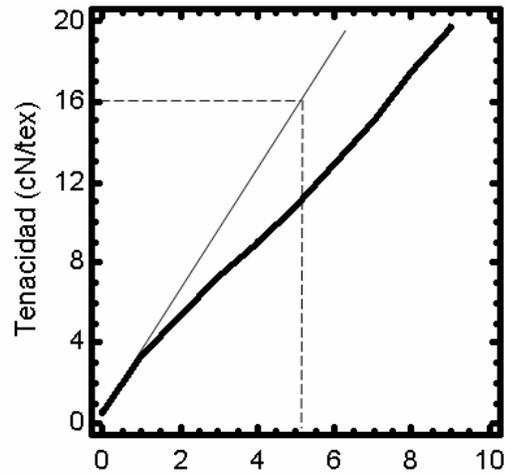
Hilo de poliéster-algodón de 19.79 tex



Alargamiento (%)
Cálculo de "A"

Figura 26

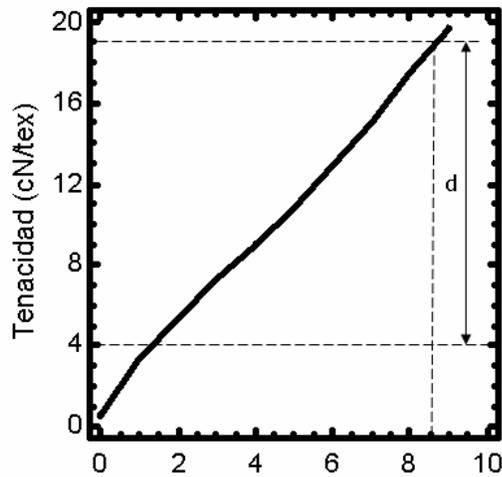
Hilo de poliéster-algodón de 19.79 tex



Alargamiento (%)
Cálculo de "B"

Figura 27

Hilo de poliéster-algodón de 19.79 tex



Alargamiento (%)

Cálculo de "C"

Figura 28

De donde,

$A = \text{fluencia}$

$$m = \frac{\sigma_y}{A_x} \quad (\text{ec. 39})$$

$$B = \frac{m}{A} \quad (\text{ec. 49})$$

$$C = \frac{(\sigma_p - \sigma_A)}{a^2} \quad (\text{ec. 41})$$

De lo anterior se desprende que,

$$A = 4.0$$

$$m = \frac{16}{5.25} = 3.04761905$$

$$B = \frac{3.04761905}{4} = 0.76190476 \quad C = \frac{(19-4)}{8.5^2} = 0.20761246$$

Por ende, el modelo de Vangheluwe ajustado a los datos de la **tabla 3** por el método gráfico es:

$$\sigma = 4.0(1 - e^{-0.76190476 \gamma}) + 0.20761246 \gamma^2$$

Ciertamente, el método gráfico es un auxiliar relativamente eficaz, ya que tiene el inconveniente que depende en gran medida de la forma de la curva a ajustar. Presentando mayor problema al ajustar datos de curvas tenacidad-alargamiento correspondientes a hilos elaborados con fibras químicas.

Ahora bien, los estimadores iniciales obtenidos por el método gráfico se refinan a través de un método iterativo Marquardt conduciendo a la siguiente ecuación:

$$\sigma = 7.844798(1 - e^{-0.479028\gamma}) + 0.149716\gamma^2$$

En la **tabla 4** abajo citada se muestra el análisis de varianza para el ajuste iterativo Marquardt. Donde se puede destacar que el coeficiente de determinación es significativo al 1% de confianza estadística y una mínima varianza residual.

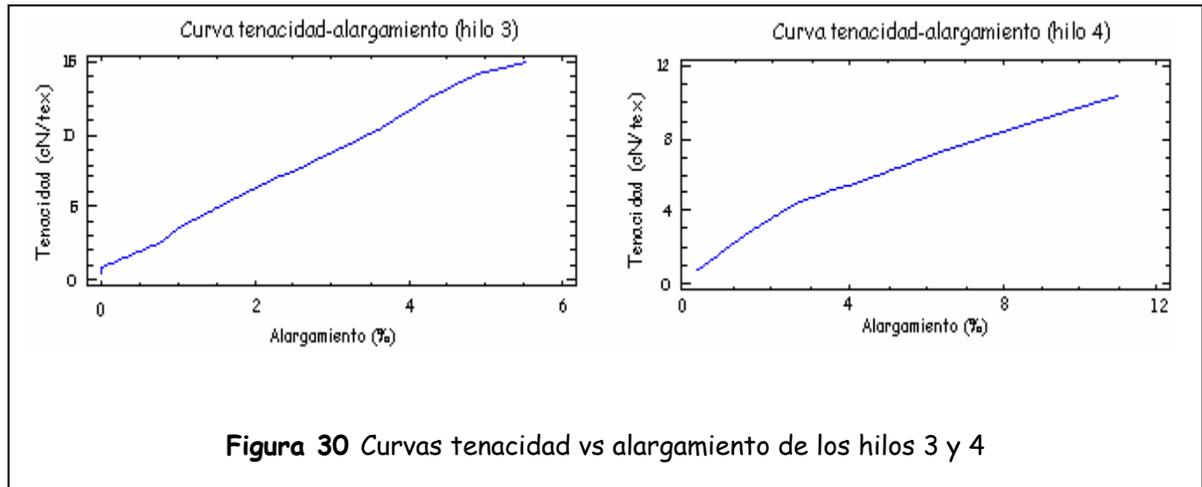
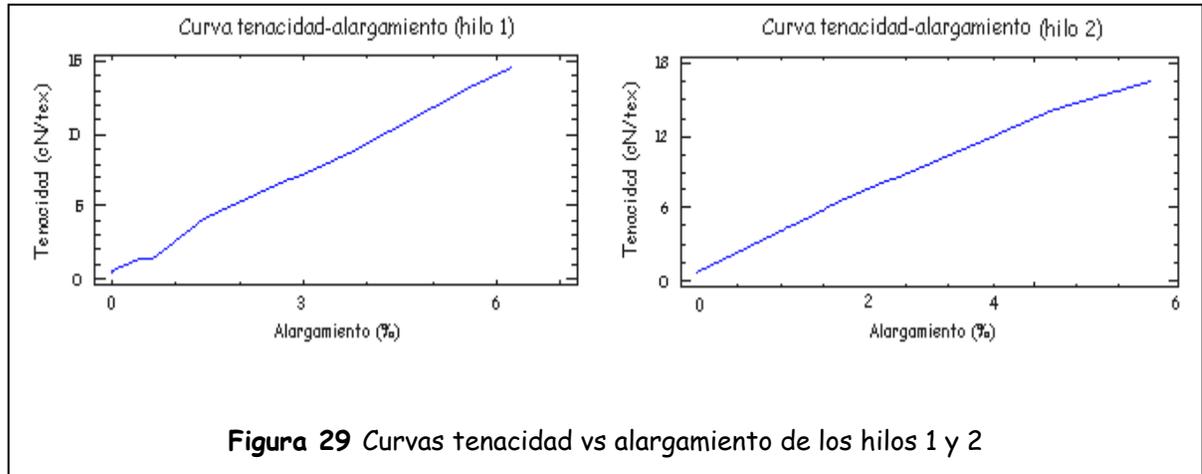
Tabla 4 Análisis de varianza

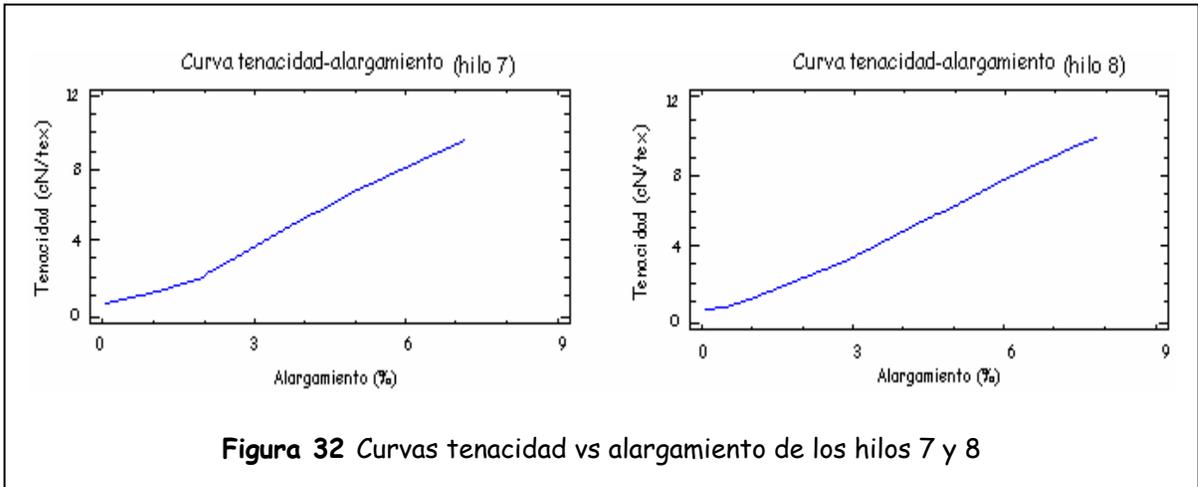
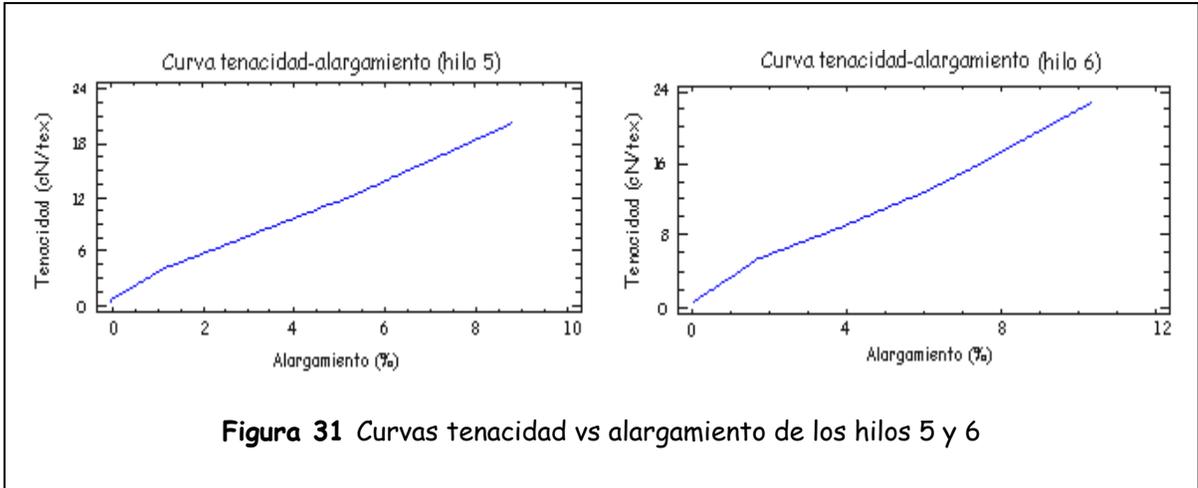
Causa	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón F
Modelo	1372.71	3	457.569	7213.17187
Residual	0.444046	7	0.0634352	
Total	1373.15	10		
Total (corr.)	346.334	9		
R ²	99.8718%			
R ² (con grados de libertad)	99.8352%			

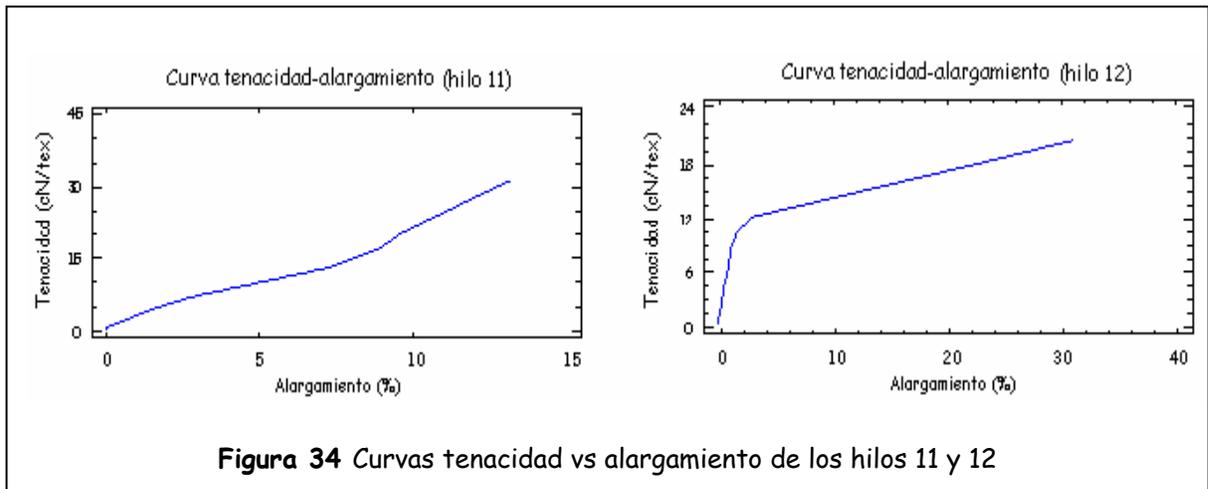
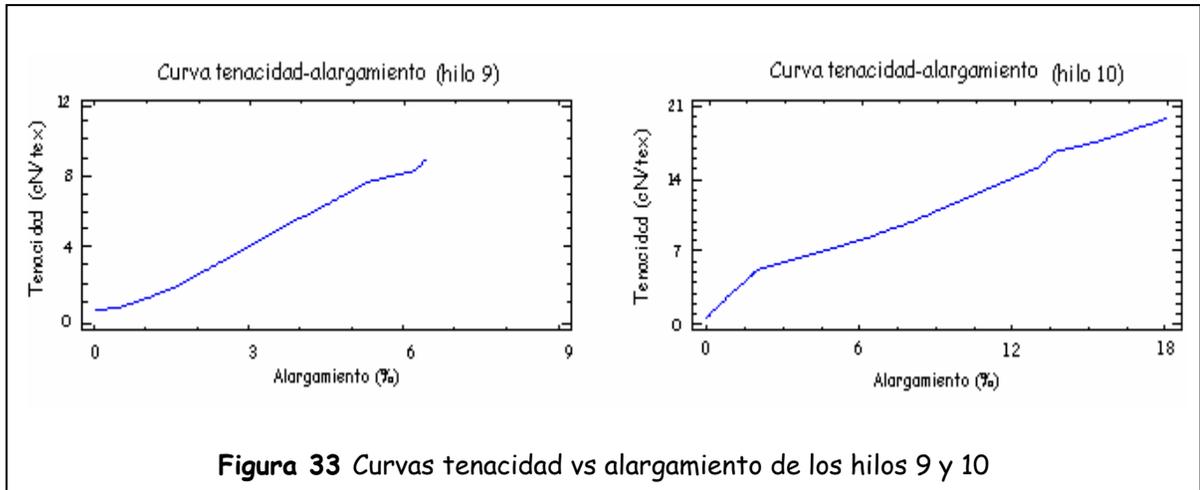
Después aplicamos los siguientes modelos matemáticos mediante el método estadístico Maquardt:

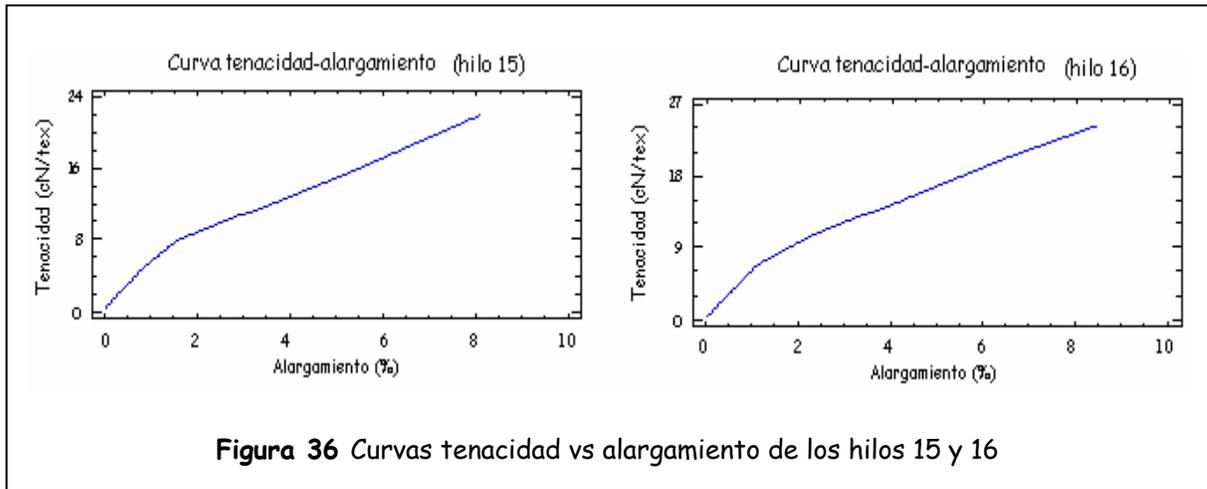
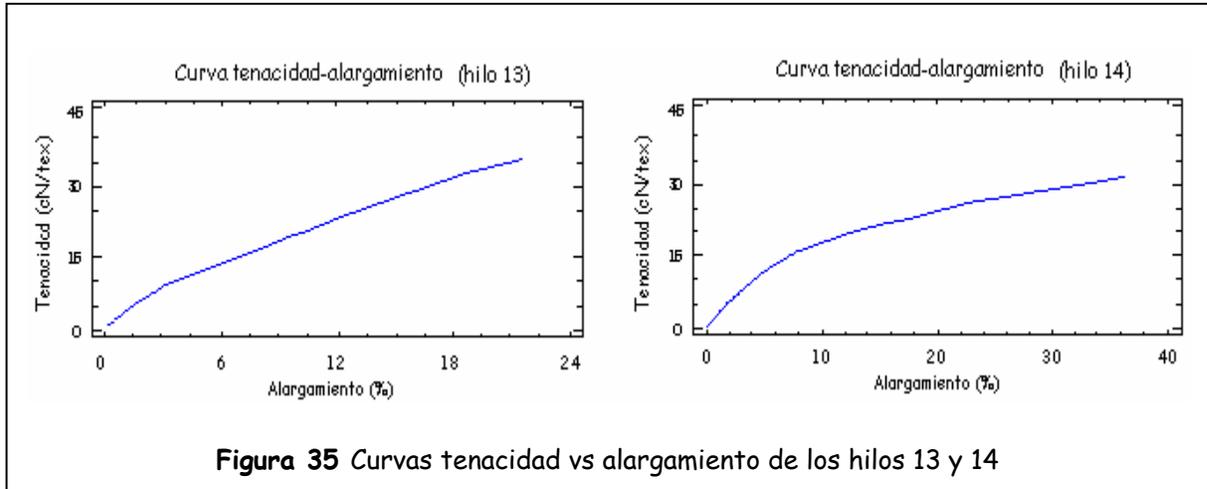
- Modelo de Maxwell
- Modelo de Vangheluwe
- Modelo de Zurek

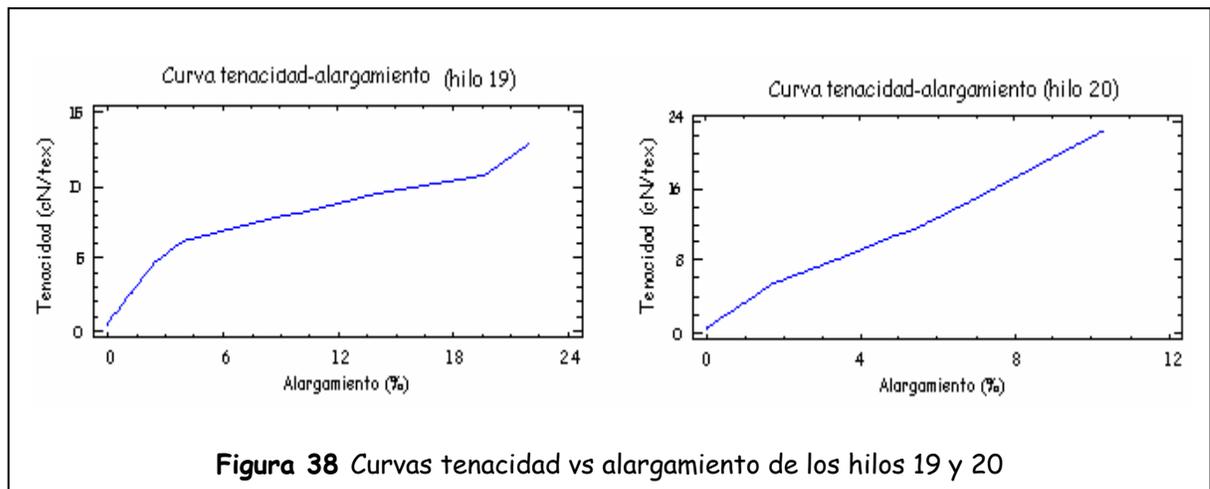
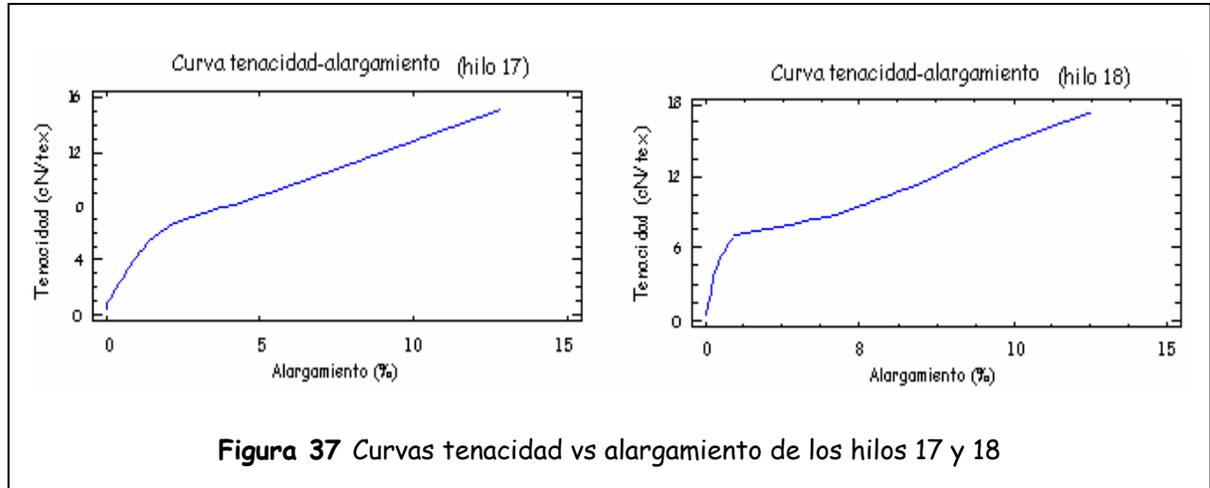
Mostramos las gráficas tenacidad vs alargamiento obtenidas del aparato de medición STATIMAT de nuestros hilos sometidos a estudio.











8. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo exhibimos los resultados arrojados por el estudio realizado en los 20 hilos aquí propuestos.

Los resultados se presentan en grupo de modelos;

- Maxwell y Maxwell modificado
- Vangheluwe, Vangheluwe modificado con cuatro parámetros, Vangheluwe modificado con cinco parámetros, y
- Zurek

Iniciamos mostrando los resultados del modelo de Maxwell y Maxwell modificado concentrados en la **tabla 5**; En la cual se indican los parámetros respectivos a cada tipo de estos modelos.

Seguidos por tablas individuales, en las cuales contempla también un análisis de varianza.

Tabla 5 Parámetros estimados del modelo de Maxwell y Maxwell modificado

No. Hilo	Maxwell			Maxwell modificado			
	a	b	R ²	a	b	c	R ²
1	2,6842	0,0241	99,68	2,5593	-0,0904	0,7533	99,76
2	4,2872	0,0610	99,84	3,8286	-0,1390	0,6396	99,72
3	3,4690	0,0416	99,68	3,0710	-0,1675	0,6506	99,63
4	1,8777	0,0659	98,91	2,3068	-0,0699	0,5222	99,89
5	2,6180	0,0166	99,37	2,1928	-0,4373	0,4665	99,92
6	1,9471	-0,0205	98,40	1,0555	-0,8622	0,4052	98,41
7	1,0832	-0,0314	99,31	0,8305	0,0245	1,4658	99,64
8	1,1966	-0,0107	99,58	1,2538	-0,0736	0,8249	99,59
9	1,3415	-0,0044	99,30	1,253	0,02675	1,1769	99,59
10	1,7707	0,0279	98,00	2,0356	-0,3988	0,3788	99,57
11	1,5985	-0,0291	98,15	1,6392	-0,3586	0,5552	98,83
12	3,7024	0,0606	71,49	9,4572	0,1697	0,4522	96,69
13	2,6471	0,0223	99,29	4,2536	-0,0352	0,6171	99,87
14	2,3207	0,0280	98,68	4,2594	0,0431	0,7084	99,94
15	4,9184	0,0773	98,26	5,1378	-0,0751	0,5717	99,68
16	5,5615	0,0810	99,11	5,7287	-0,1211	0,5092	99,98
17	2,921	0,0783	94,12	4,0148	-0,0467	0,4516	99,38
18	1,8744	0,0400	86,14	3,1677	-0,3441	0,2854	97,17
19	1,6419	0,0525	94,47	3,0742	0,0053	0,4492	98,64
20	2,4433	0,0102	99,92	2,5409	0,0094	0,9773	99,92

8.1 REGRESIÓN NO LINEAL DEL MODELO DE MAXWELL

Tabla 6 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 1)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2,6842	0,1576	2,3115	3,0569
b	0,0241	0,0107	-0,0012	0,0496
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		496,442	2	248,221
Residual		0,7276	7	0,1039
Total		497,17	9	
R ² ajustada		99,6537%		
Error estándar		0,3224		
Error medio absoluto		0,2497		

Tabla 7 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 2)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	4,2872	0,2034	3,7223	4,8520
b	0,0610	0,0103	0,0322	0,0897
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		546,316	2	273,158
Residual		0,3583	4	0,0895
Total		546,674	6	
R ² ajustada		99,8018%		
Error estándar		0,2993		
Error medio absoluto		0,2026		

Tabla 8 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 3)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	3,4690	0,1927	3,0132	3,9248
b	0,0416	0,0120	0,0132	0,0701
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		753,052	2	376,526
Residual		0,8646	7	0,1235
Total		753,917	9	
R ² ajustada		99,6364		
Error estándar		0,3514		
Error medio absoluto		1,4981		

Tabla 9 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 4)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1,8777	0,1890	1,3916	2,3638
b	0,0659	0,0110	0,0376	0,0942
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		277,957	2	138,978
Residual		1,0794	5	0,2158
Total		279,036	7	
R ² ajustada		98,6872%		
Error estándar		0,4646		
Error medio absoluto		0,3599		

Tabla 10 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 5)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2,6180	0,2738	1,9479	3,2881
b	0,0166	0,0140	-0,0176	0,0509
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1060,88	2	530,441
Residual		2,7851	6	0,4641
Total		1063,67	8	
R ² ajustada		99,2718%		
Error estándar		0,6813		
Error medio absoluto		1,1831		

Tabla 11 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 6)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1,9471	0,2552	1,3225	2,5769
b	-0,0205	0,0150	-0,0573	0,0162
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1104,62	2	552,31
Residual		8,4530	6	1,4088
Total		1113,07	8	
R ² ajustada		98,1401%		
Error estándar		1,1869		
Error medio absoluto		0,7788		

Tabla 12 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 7)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1,0832	0,0993	0,8400	1,3264
b	-0,0314	0,0142	-0,0664	0,0034
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		243,319	2	121,66
Residual		0,6550	6	0,1091
Total		243,974	8	
R ² ajustada		99,1979%		
Error estándar		0,3304		
Error medio absoluto		0,2252		

Tabla 13 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 8)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1,1966	0,0963	0,9688	1,4244
b	-0,0107	0,0117	-0,0385	0,0169
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		303,751	2	151,875
Residual		0,5488	7	0,0784
Total		304,3	9	
R ² ajustada		99,523%		
Error estándar		0,2800		
Error medio absoluto		0,1932		

Tabla 14 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 9)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1,3415	0,1437	1,0015	1,6815
b	-0,0044	0,0185	-0,0482	0,0394
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		229,846	2	114,923
Residual		0,7247	7	0,1035
Total		230,57	9	
R ² ajustada		99,2061%		
Error estándar		0,3217		
Error medio absoluto		1,1593		

Tabla 15 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 10)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1,7707	0,2473	1,2003	2,3411
b	0,0279	0,0095	0,0059	0,0499
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1320,37	2	660,184
Residual		10,1983	8	1,2747
Total		1330,57	10	
R ² ajustada		97,7512%		
Error estándar		1,1290		
Error medio absoluto		0,8334		

Tabla 16 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 11)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1,5985	0,2607	0,982	2,2150
b	-0,0291	0,0146	-0,0637	0,0054
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1980,05	2	990,023
Residual		17,1431	7	2,4490
Total		1997,19	9	
R ² ajustada		97,8883%		
Error estándar		1,5649		
Error medio absoluto		1,2040		

Tabla 17 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 12)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	3,7024	0,9562	1,3626	6,0423
b	0,0606	0,0124	0,0302	0,0910
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1242,02	2	621,012
Residual		109,853	6	18,3089
Total		1351,88	8	
R ² ajustada		66,7414%		
Error estándar		4,2789		
Error medio absoluto		3,2613		

Tabla 18 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 13)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2,6471	0,2116	2,1292	3,1650
b	0,0223	0,0044	0,0113	0,0333
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		3314,07	2	1657,03
Residual		9,5994	6	1,5999
Total		3323,67	8	
R ² ajustada		99,1804%		
Error estándar		1,2648		
Error medio absoluto		0,8806		

Tabla 19 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 14)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2,3207	0,1561	1,9387	2,7028
b	0,0280	0,0023	0,0222	0,0339
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		3369,89	2	1684,94
Residual		11,9231	6	1,9871
Total		3381,81	8	
R ² ajustada		98,4748%		
Error estándar		1,4096		
Error medio absoluto		1,0677		

Tabla 20 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 15)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	4,9184	0,7622	2,8021	7,0347
b	0,0773	0,0226	0,0144	0,1402
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		811,012	2	405,506
Residual		6,4714	4	1,6178
Total		817,484	6	
R ² ajustada		97,8313%		
Error estándar		1,2719		
Error medio absoluto		0,9247		

Tabla 21 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 16)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	5,5615	0,6023	3,6445	7,4786
b	0,0810	0,0152	0,0326	0,1294
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1160,73	2	580,366
Residual		3,3585	3	1,11952
Total		1164,09	5	
R ² ajustada		98,8233%		
Error estándar		1,0580		
Error medio absoluto		0,7213		

Tabla 22 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 17)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2,921	0,4730	1,8024	4,0395
b	0,0783	0,0169	0,0383	0,1184
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		697,485	2	348,743
Residual		12,8965	7	1,8423
Total		710,382	9	
R ² ajustada		93,2881%		
Error estándar		1,3573		
Error medio absoluto		1,1012		

Tabla 23 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 18)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1,8744	0,4209	0,9222	2,8265
b	0,0400	0,0134	0,0095	0,0706
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1145,86	2	572,93
Residual		51,9024	9	5,7669
Total		1197,76	11	
R ² ajustada		84,6042%		
Error estándar		2,4014		
Error medio absoluto		1,6921		

Tabla 24 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 19)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1,6419	0,33322	0,7878	2,4959
b	0,0525	0,0113	0,0233	0,0816
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		423,018	2	211,509
Residual		7,8487	5	1,5697
Total		430,867	7	
R ² ajustada		93,3705%		
Error estándar		1,2528		
Error medio absoluto		0,9687		

Tabla 25 Regresión no lineal del modelo de Maxwell (Hilo 20)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2,4433	0,0692	2,2796	2,6070
b	0,0102	0,0014	0,0067	0,01371
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		6727,09	2	3363,54
Residual		1,8677	7	0,2668
Total		6728,96	9	
R ² ajustada		99,9152%		
Error estándar		0,5165		
Error medio absoluto		0,4314		

8.2 REGRESIÓN NO LINEAL DEL MODELO DE MAXWELL MODIFICADO

Tabla 26 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 1)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2,5593	0,3151	1,7883	3,3303
c	0,7533	0,1583	0,3659	1,1408
b	-0,0904	0,1316	-0,4126	0,2318
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		496,615	3	165,538
Residual		0,5554	6	0,0925
Total		497,17	9	
R ² ajustada		99,6915		
Error estándar		0,3042		
Error medio absoluto		0,1935		

Tabla 27 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 2)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	3,8286	1,1700	0,1049	7,5523
c	0,6386	0,2632	-0,1992	1,4765
b	-0,1390	0,3271	-1,1800	0,9019
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		546,063	3	182,021
Residual		0,6113	3	0,2037
Total		546,674	6	
R ² ajustada		99,5492%		
Error estándar		0,4514		
Error medio absoluto		0,2911		

Tabla 28 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 3)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	3,0710	0,9033	0,8606	5,2814
c	0,6506	0,2437	0,0540	1,2471
b	-0,1675	0,3122	-0,9316	0,5965
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		752,911	3	250,97
Residual		1,0059	6	0,1676
Total		753,917	9	
R ² ajustada		99,5065%		
Error estándar		0,4094		
Error medio absoluto		0,2590		

Tabla 29 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 4)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2,3068	0,2075	1,7306	2,8830
c	0,5222	0,0892	0,2744	0,7700
b	-0,0699	0,1016	-0,3523	0,2123
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		278,928	3	92,976
Residual		0,1082	4	0,0270
Total		279,036	7	
R ² ajustada		99,8367%		
Error estándar		0,1645		
Error medio absoluto		0,0877		

Tabla 30 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 5)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2,1928	1,6485	-2,0448	6,4305
c	0,4665	0,2629	-0,2093	1,1423
b	-0,4373	0,7458	-2,3545	1,4798
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1063,35	3	354,451
Residual		0,3161	5	0,0632
Total		1063,67	8	
R ² ajustada		99,9008%		
Error estándar		0,2514		
Error medio absoluto		0,1772		

Tabla 31 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 6)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1,0555	4,4305	-10,3336	12,4448
c	0,4052	0,7509	-1,5250	2,3354
b	-0,8622	3,8415	-10,7372	9,0127
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1104,68	3	368,226
Residual		8,3941	5	1,6788
Total		1113,07	8	
R ² ajustada		97,7837%		
Error estándar		1,2956		
Error medio absoluto		0,6972		

Tabla 32 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 7)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	0,8305	0,1261	0,5063	1,1547
c	1,4658	0,1611	1,0516	1,8800
b	0,0245	0,0046	0,0126	0,0364
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		243,633	3	81,2109
Residual		0,3414	5	0,0682
Total		243,974	8	
R ² ajustada		99,4983%		
Error estándar		0,2613		
Error medio absoluto		0,1383		

Tabla 33 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 8)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1,2538	0,1225	0,9538	1,5538
c	0,8249	0,2451	0,2250	1,4248
b	-0,0736	0,1361	-0,4067	0,2594
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		303,771	3	101,257
Residual		0,5281	6	0,0880
Total		304,3	9	
R ² ajustada		99,44644%		
Error estándar		0,2967		
Error medio absoluto		0,2021		

Tabla 34 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 9)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1,2538	0,1225	0,9538	1,5538
c	0,8249	0,2451	0,2250	1,4248
b	-0,0736	0,1361	-0,4067	0,2594
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		303,771	3	101,257
Residual		0,5281	6	0,0880
Total		304,3	9	
R ² ajustada		99,44644%		
Error estándar		0,2967		
Error medio absoluto		0,2021		

Tabla 35 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 10)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2,0356	3,2388	-5,6230	9,6943
c	0,3788	0,4825	-0,7622	1,5198
b	-0,3988	1,5987	-4,1793	3,3816
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1328,42	3	442,807
Residual		2,1462	7	0,3066
Total		1330,57	9	
R ² ajustada		99,4591%		
Error estándar		0,5537		
Error medio absoluto		0,3668		

Tabla 36 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 11)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1,6392	5,5882	-12,0348	15,3133
c	0,5552	1,5954	-3,3487	4,4591
b	-0,3586	3,3807	-8,6309	7,9136
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1986,41	3	662,137
Residual		10,7779	6	1,7963
Total		1997,19	9	
R ² ajustada		98,4511%		
Error estándar		1,3402		
Error medio absoluto		0,9672		

Tabla 37 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 12)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	9,4573	1,2450	6,2567	12,6577
c	0,4523	0,1112	0,1663	0,7381
b	0,1697	0,0335	0,0835	0,2558
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1339,13	3	446,378
Residual		12,7439	5	2,5487
Total		1351,88	8	
R ² ajustada		95,3701%		
Error estándar		1,5964		
Error medio absoluto		1,1671		

Tabla 38 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 13)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	4,2536	0,2354	3,6485	4,8588
c	0,6171	0,0986	0,3636	0,8706
b	-0,0352	0,0597	-0,1888	0,1183
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		3321,92	3	1107,31
Residual		1,7481	5	0,3496
Total		3323,67	8	
R ² ajustada		99,8209%		
Error estándar		0,5913		
Error medio absoluto		0,4146		

Tabla 39 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 14)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	4,2594	0,2344	3,6567	4,8620
c	0,7084	0,0300	0,6313	0,7855
b	0,0431	0,0017	0,03873	0,0476
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		3381,3	3	1127,1
Residual		0,5060	5	0,1012
Total		3381,81	8	
R ² ajustada		99,9223%		
Error estándar		0,3181		
Error medio absoluto		0,2259		

Tabla 40 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 15)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	5,1378	1,0320	1,8534	8,4244
c	0,5717	0,1761	0,0112	1,1321
b	-0,0751	0,2008	-0,7143	0,5639
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		816,305	3	272,102
Residual		1,1787	3	0,3929
Total		817,484	6	
R ² ajustada		99,4733%		
Error estándar		0,6168		
Error medio absoluto		0,3793		

Tabla 41 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 16)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	5,7287	0,4915	3,6136	7,8438
c	0,5092	0,0661	0,2245	0,7938
b	-0,1211	0,0949	-0,5197	0,2875
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1164,03	3	388,012
Residual		0,0554	2	0,0277
Total		1164,09	5	
R ² ajustada		99,9709%		
Error estándar		0,1664		
Error medio absoluto		0,0962		

Tabla 42 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 17)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	4,0148	0,6393	2,4503	5,5794
c	0,4516	0,1210	0,1553	0,7479
b	-0,0467	0,1648	-0,4500	0,3566
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		709,036	3	236,345
Residual		1,3456	6	0,2242
Total		710,382	9	
R ² ajustada		99,1829%		
Error estándar		0,4735		
Error medio absoluto		1,6174		

Tabla 43 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 18)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	3,1677	4,0618	-6,1988	12,5344
c	0,2854	0,3454	-0,5111	1,0820
b	-0,3441	1,2011	-3,1140	2,4258
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1187,19	3	395,73
Residual		10,5706	8	1,3213
Total		1197,76	11	
R ² ajustada		96,4725%		
Error estándar		1,1494		
Error medio absoluto		0,8530		

Tabla 44 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 19)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	3,0742	0,5329	1,5944	4,5540
c	0,4492	0,2056	-0,1217	1,0203
b	0,0053	0,1821	-0,5003	0,5111
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		428,942	3	142,981
Residual		1,9251	4	0,4812
Total		430,867	7	
R ² ajustada		97,9674%		
Error estándar		0,6937		
Error medio absoluto		0,4529		

Tabla 45 Regresión no lineal del modelo de Maxwell modificado (Hilo 20)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2,5409	0,3037	1,7975	3,2843
c	0,9773	0,0673	0,8124	1,1422
b	0,0094	0,0032	0,0015	0,0173
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		6727,12	3	2242,37
Residual		1,8358	6	0,3059
Total		6728,96	9	
R ² ajustada		99,9028%		
Error estándar		0,5531		
Error medio absoluto		0,4114		

8.3 REGRESIÓN NO LIENAL DEL MODELO DE VANGHELUWE

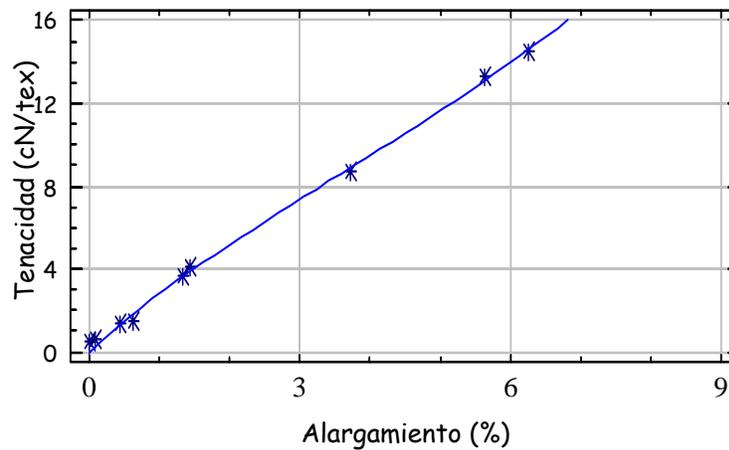
Tabla 46 Parámetros estimados de los modelos de Vangheluwe, Vangheluwe modificado con cuatro parámetros y Vangheluwe modificado con cinco parámetros.

No. Hilo	Vangheluwe				Vangheluwe modificado con cuatro parámetros					Vangheluwe modificado con cinco parámetros					
	a	b	c	R ²	a	b	c	d	R ²	a	b	c	d	e	R ²
1	9,2199	0,3334	0,1665	99,77	40,6068	0,0006	2,7014	0,9103	99,75	6,3902	0,4163	0,6012	1,4734	0,8833	99,77
2	20,7946	0,2143	0,0840	99,81	15,2998	0,2092	1,1727	1,0001	99,82	16,3726	0,2161	0,8191	1,0647	1,0443	99,82
3	13,2335	0,2865	0,1591	99,53	22,6851	0,0556	2,2318	0,8909	99,70	11,1409	0,2259	1,2346	1,1615	0,77774	99,70
4	6,5571	0,3967	0,0319	99,41	8,7922	0,0633	1,8663	0,6134	99,86	9,2910	0,2845	0,1756	1,2825	0,6020	99,86
5	2,2355	0,5489	0,1586	99,86	2,3954	2,8214	1,399	1,1711	99,93	4,4395	0,9693	0,8197	1,3634	0,7444	99,94
6	8,3468	0,5008	0,1349	99,82	3,9430	1,2188	0,7813	1,3598	99,91	3,9293	1,3743	0,8000	1,3495	0,9433	99,94
7	4,6056	0,2538	0,1155	99,22	7,5651	0,0866	0,1987	1,4728	99,64	6,9993	0,0211	0,8818	0,6841	2,3312	99,88
8	10,5417	0,1187	0,0625	99,56	5,4836	0,0475	0,8902	1,0794	99,55	3,2858	0,0742	1,0090	1,1176	-0,1841	99,91
9	12,9789	0,1054	0,0604	99,27	7,1757	0,1034	0,5404	1,1536	99,32	0,5583	0,2127	1,2149	1,0683	-0,5591	99,32
10	8,7307	0,9333	0,0369	99,14	3,6719	1,2445	0,6258	1,1362	99,64	10,9179	0,3224	0,1772	1,4469	0,5506	99,60
11	5,9190	0,9447	0,1481	99,68	5,4175	1,1261	0,1772	1,9377	99,64	5,5454	1,0416	0,1725	1,9458	1,2011	99,68
12	13,6406	0,8867	0,0076	99,78	12,2286	1,1026	0,1916	1,1113	99,94	12,4668	1,0399	0,1015	1,2826	1,0759	99,93
13	20,5141	0,1828	0,0344	99,63	2,1237	1,6388	2,8580	0,8044	99,88	22,7879	0,2027	0,1767	1,4828	0,7204	99,84
14	23,2833	0,1365	0,0064	99,89	17,7482	0,1836	0,6546	0,8539	99,99	24,3411	0,1593	0,0657	1,3398	0,8378	99,98
15	11,3011	0,6956	0,1637	99,95	6,1147	1,3785	1,3257	1,1866	99,92	11,7899	0,6600	0,1331	2,0779	0,9687	99,95
16	15,3815	0,4736	0,1300	99,81	6,3470	1,1408	1,9925	1,0339	99,91	10,6098	0,6910	0,8371	1,3146	0,9297	100
17	8,3662	0,7016	0,0422	99,76	5,1168	1,3106	0,7177	1,0310	99,85	6,8426	0,9429	0,2479	1,3776	0,8682	99,88
18	8,0314	1,4337	0,0235	99,28	6,4552	2,5534	0,2145	1,3111	99,78	6,4321	2,5998	0,2194	1,3043	1,3292	99,78
19	7,0484	0,4479	0,0112	99,31	4,8197	0,7503	0,2763	1,0672	99,09	7,0769	0,5525	0,0143	1,9176	0,7904	99,36
20	37,0422	0,0738	0,0273	99,86	21,1951	0,0644	0,8494	1,0927	99,90	31,7088	0,0736	0,2033	1,4431	0,9975	99,90

Tabla 47 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 1)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	9,2467	3,5975	0,4438	18,0497
b	0,3323	0,1614	-0,0627	0,7274
c	0,1661	0,0550	0,0315	0,3008
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		496,673	3	165,558
Residual		0,5262	6	0,0910
Total		497,219	9	
R ² ajustada		99,6967%		
Error estándar		0,3017		
Error medio absoluto		0,2000		

Tenacidad Vs. Alargamiento



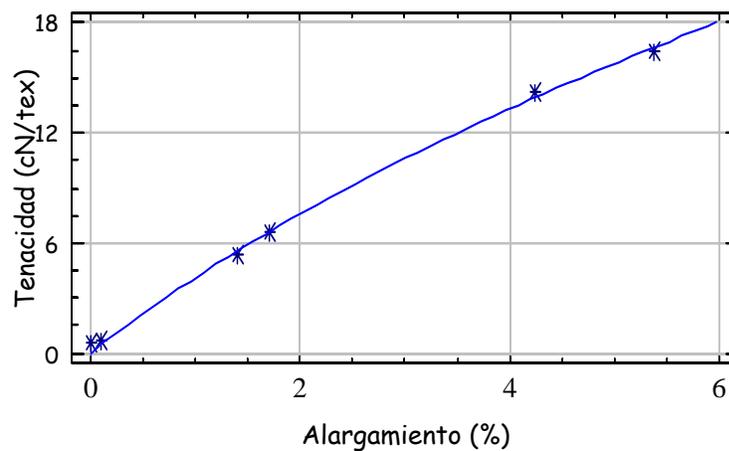
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 1)

Figura 39

Tabla 48 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 2)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	20,7946	21,8148	-48,6299	90,2192
b	0,2143	0,2583	-0,6078	1,0364
c	0,0840	0,2286	-0,6426	0,8116
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		546,181	3	182,06
Residual		0,4200	3	0,1400
Total		546,601	6	
R ² ajustada		99,6902%		
Error estándar		0,3741		
Error medio absoluto		0,2295		

Tenacidad Vs. Alargamiento



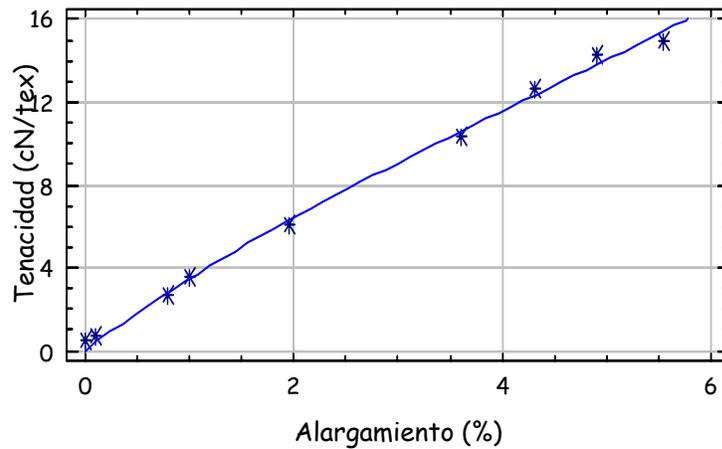
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 2)

Figura 40

Tabla 49 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 3)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	13,2335	7,1736	-4,3197	30,7867
b	0,2865	0,2004	0,2038	0,7769
c	0,1591	0,1088	-0,1071	0,4255
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		752,634	3	250,878
Residual		0,9506	6	0,1584
Total		753,585	9	
R ² ajustada		99,5336%		
Error estándar		0,3980		
Error medio absoluto		0,2993		

Tenacidad Vs. Alargamiento



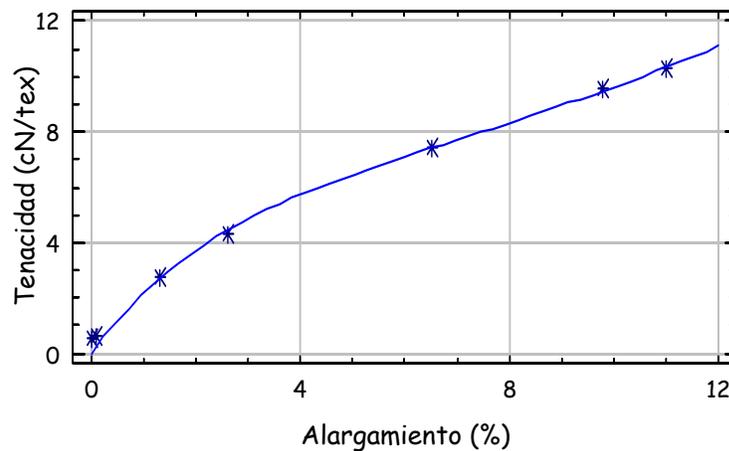
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 3)

Figura 41

Tabla 50 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 4)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	6,5571	1,0145	3,7403	9,3739
b	0,3967	0,1086	0,0952	0,6983
c	0,0319	0,0087	0,0075	0,0563
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		278,541	3	92,8468
Residual		0,3864	4	0,0966
Total		278,927	7	
R ² ajustada		99,4162%		
Error estándar		0,3108		
Error medio absoluto		0,1689		

Tenacidad Vs. Alargamiento



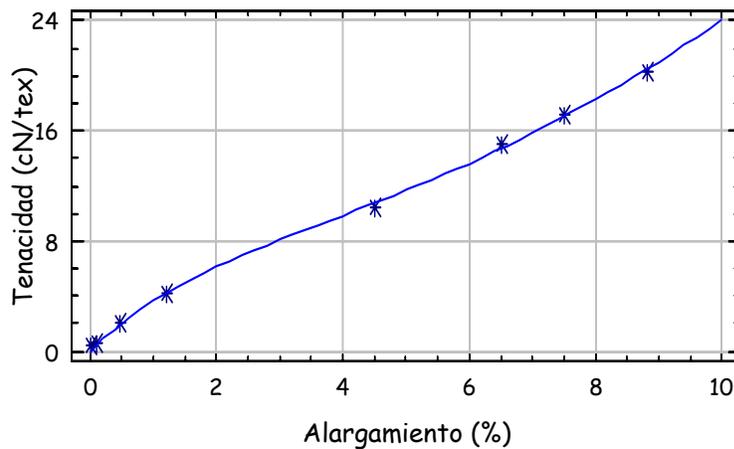
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 4)

Figura 42

Tabla 51 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 5)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	8,2355	0,8159	6,1381	10,333
b	0,5489	0,1080	0,2710	0,8267
c	0,1586	0,0123	0,1267	0,1904
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1062,55	3	354,184
Residual		0,6020	5	0,1204
Total		1063,15	8	
R ² ajustada		99,8111%		
Error estándar		0,3470		
Error medio absoluto		0,2397		

Tenacidad Vs. Alargamiento



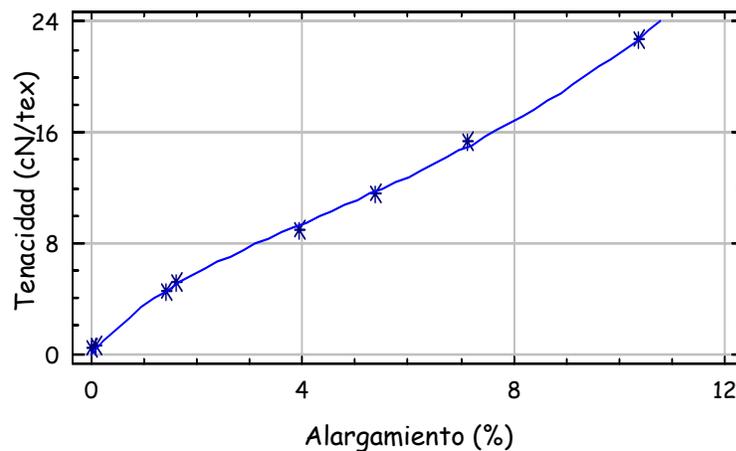
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 5)

Figura 43

Tabla 52 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 6)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	8,3468	0,6134	6,7698	9,9238
b	0,5008	0,0772	0,3022	0,6994
c	0,1349	0,0070	0,1167	0,1532
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1010,82	3	336,938
Residual		0,5077	5	0,1015
Total		1011,32	8	
R ² ajustada		99,8273%		
Error estándar		0,3186		
Error medio absoluto		0,1996		

Tenacidad Vs. Alargamiento



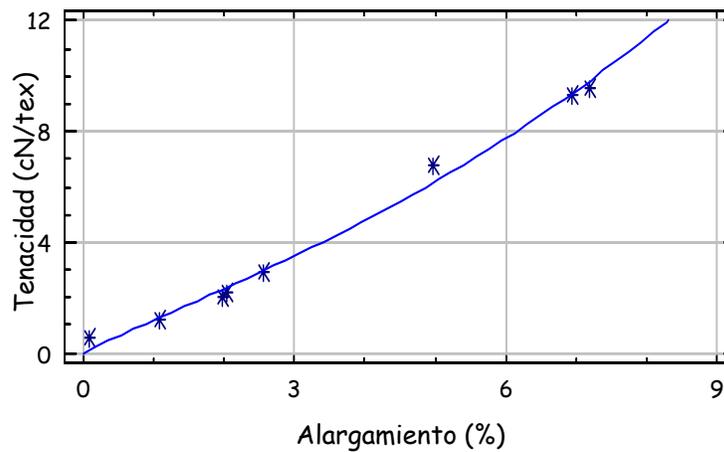
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 6)

Figura 44

Tabla 53 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 7)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	4,6056	6,5117	-12,1334	21,3446
b	0,2538	0,4502	-0,4502	1,4113
c	0,1155	0,0647	-0,0510	0,2820
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		243,231	3	81,077
Residual		0,7431	5	0,1486
Total		243,974	8	
R ² ajustada		98,9081%		
Error estándar		0,3855		
Error medio absoluto		0,2354		

Tenacidad Vs. Alargamiento



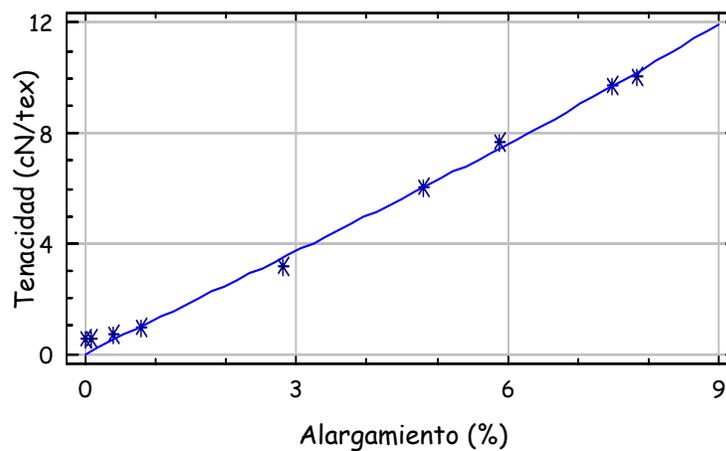
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 7)

Figura 45

Tabla 54 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 8)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	10,5417	24,7511	-50,0221	71,1055
b	0,1187	0,3140	-0,6496	0,8872
c	0,0625	0,0882	-0,1535	0,2785
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		303,731	3	101,244
Residual		0,5689	6	0,0948
Total		304,3	9	
R ² ajustada		99,4231%		
Error estándar		0,3079		
Error medio absoluto		0,2004		

Tenacidad Vs. Alargamiento



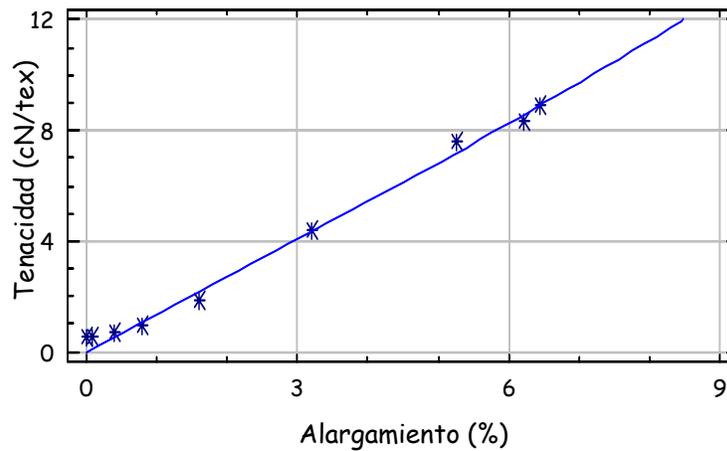
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 8)

Figura 46

Tabla 55 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 9)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	12,9789	63,909	-143,401	169,359
b	0,1054	0,5595	-1,2637	1,4745
c	0,0604	0,2198	-0,4774	0,5983
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		229,819	3	76,6063
Residual		0,7516	6	0,1252
Total		230,57	9	
R ² ajustada		99,0394%		
Error estándar		0,3539		
Error medio absoluto		0,2467		

Tenacidad Vs. Alargamiento



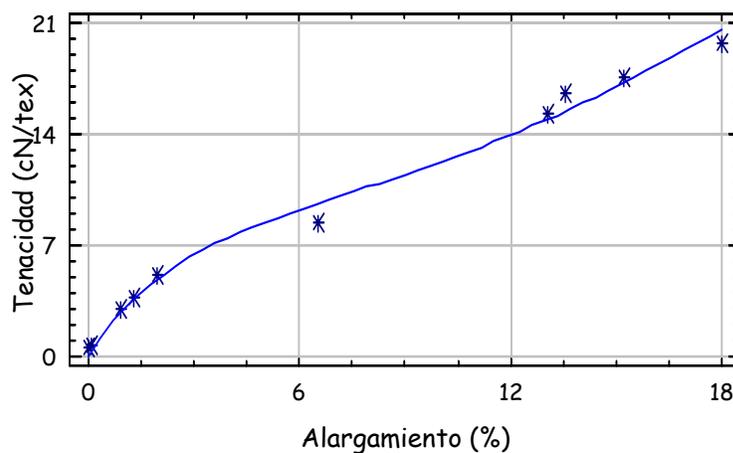
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 9)

Figura 47

Tabla 56 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 10)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	8,7307	1,1983	5,8971	11,5645
b	0,3933	0,1101	0,1328	0,6538
c	0,0369	0,0051	0,0247	0,0491
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1321,22	3	442,072
Residual		4,3516	7	0,6216
Total		1330,57	10	
R ² ajustada		99,9034%		
Error estándar		0,7884		
Error medio absoluto		0,5382		

Tenacidad Vs. Alargamiento



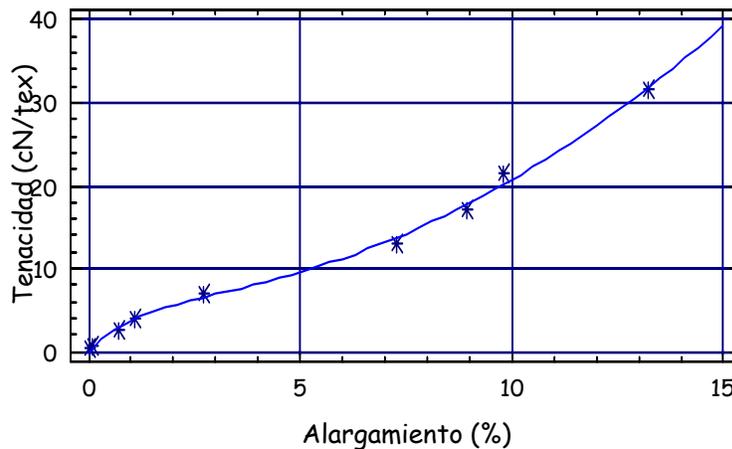
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 10)

Figura 48

Tabla 57 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 11)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	5,9190	0,7295	4,1337	7,7042
b	0,9447	0,3082	0,1905	1,6990
c	0,1481	0,0068	0,1314	0,1648
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1994,22	3	664,741
Residual		2,9682	6	0,4947
Total		1997,19	9	
R ² ajustada		99,5734%		
Error estándar		0,7033		
Error medio absoluto		0,4577		

Tenacidad Vs. Alargamiento



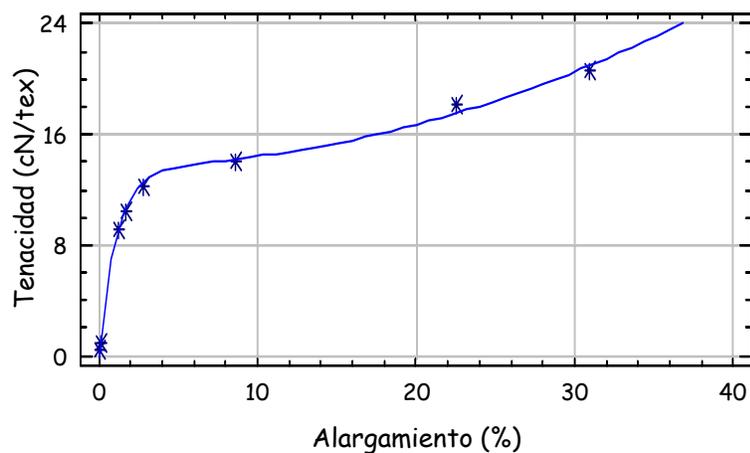
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 11)

Figura 49

Tabla 58 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 12)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	13,6406	0,3668	12,6975	14,5838
b	0,8867	0,0738	0,6969	1,0765
c	0,0076	0,0006	0,0060	0,0092
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1299,1	3	433,033
Residual		0,8148	5	0,1629
Total		1299,92	8	
R ² ajustada		99,6921%		
Error estándar		0,4036		
Error medio absoluto		0,2805		

Tenacidad Vs. Alargamiento



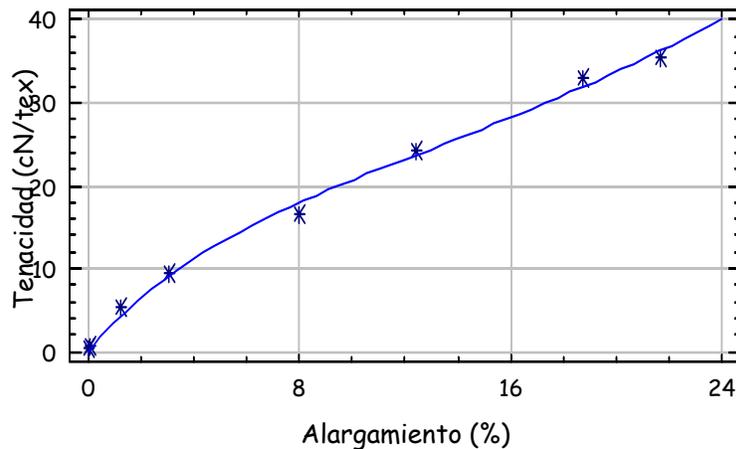
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 12)

Figura 50

Tabla 59 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 13)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	20,5141	3,4266	11,7055	29,3227
b	0,1828	0,0551	0,0410	0,3246
c	0,0344	0,0073	0,0156	0,0531
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		3318,64	3	1106,21
Residual		5,0290	5	1,0058
Total		3323,67	8	
R ² ajustada		99,4847%		
Error estándar		1,0029		
Error medio absoluto		0,7120		

Tenacidad Vs. Alargamiento



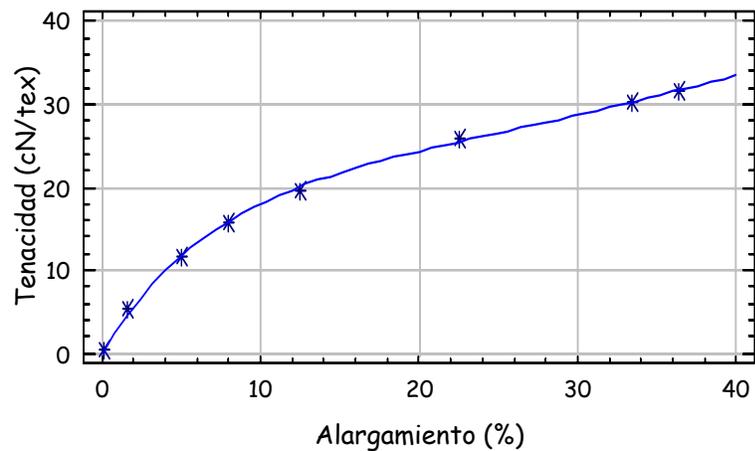
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 13)

Figura 51

Tabla 60 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 14)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	23,2833	1,0607	20,5566	26,0099
b	0,1365	0,0119	0,1057	0,1672
c	0,0067	0,0008	0,0041	0,0087
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		3380,87	3	1126,96
Residual		0,9378	5	0,1875
Total		3381,81	8	
R ² ajustada		99,856%		
Error estándar		0,4330		
Error medio absoluto		0,2737		

Tenacidad Vs. Alargamiento



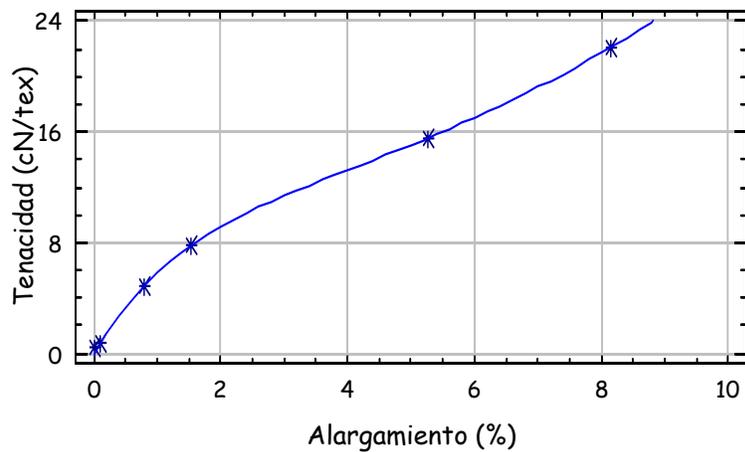
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 14)

Figura 52

Tabla 61 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 15)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	11,3011	0,6071	9,3689	13,2333
b	0,6956	0,0684	0,4779	0,9133
c	0,1637	0,0107	0,1295	0,1979
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		817,303	3	272,434
Residual		0,1801	3	0,0600
Total		817,484	6	
R ² ajustada		99,9195%		
Error estándar		0,2450		
Error medio absoluto		0,0846		

Tenacidad Vs. Alargamiento



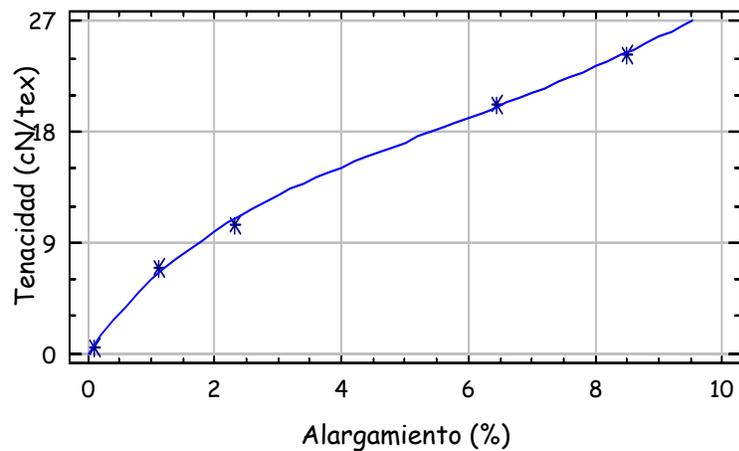
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 15)

Figura 53

Tabla 62 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 16)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	15,3815	2,6625	3,9253	26,8377
b	0,4736	0,1328	-0,0980	1,0454
c	0,1300	0,0367	-0,0282	0,2883
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1163,39	3	387,797
Residual		0,6989	2	0,3494
Total		1164,09	5	
R ² ajustada		99,6327%		
Error estándar		0,5911		
Error medio absoluto		0,3336		

Tenacidad Vs. Alargamiento



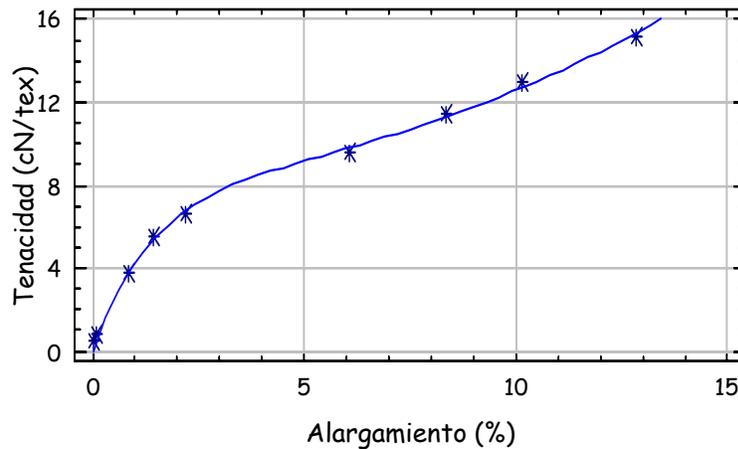
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 16)

Figura 54

Tabla 63 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 17)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	8,3662	0,3553	7,4967	9,2358
b	0,7016	0,0694	0,5316	0,8716
c	0,0422	0,0032	0,0342	0,0502
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		709,864	3	236,621
Residual		0,5172	6	0,0862
Total		710,3829	9	
R ² ajustada		99,6859%		
Error estándar		0,2936		
Error medio absoluto		0,2143		

Tenacidad Vs. Alargamiento



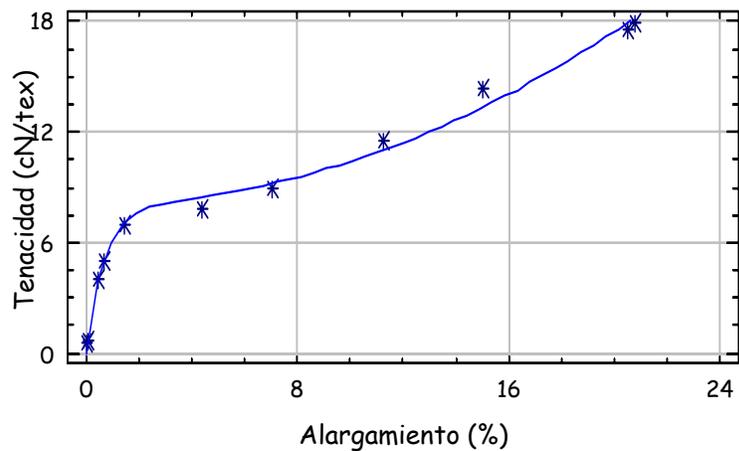
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 17)

Figura 55

Tabla 64 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 18)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	8,0322	0,3754	7,1664	8,8980
b	1,4344	0,2218	0,9226	1,9461
c	0,0235	0,0014	0,0202	0,0267
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1195,31	3	198,435
Residual		2,6996	8	0,3374
Total		1198,01	11	
R ² ajustada		98,9776%		
Error estándar		0,4920		
Error medio absoluto		0,3187		

Tenacidad Vs. Alargamiento



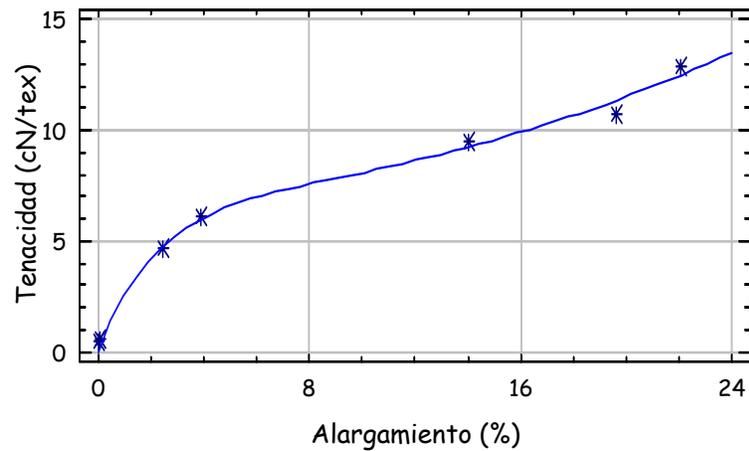
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 18)

Figura 56

Tabla 65 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 19)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	7,0484	0,8683	4,6374	9,4593
b	0,4479	0,1352	0,0725	0,8233
c	0,0112	0,0023	0,0048	0,0176
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		429,899	3	143,3
Residual		0,9683	4	0,2420
Total		430,867	7	
R ² ajustada		98,9776%		
Error estándar		0,4920		
Error medio absoluto		0,3181		

Tenacidad Vs. Alargamiento



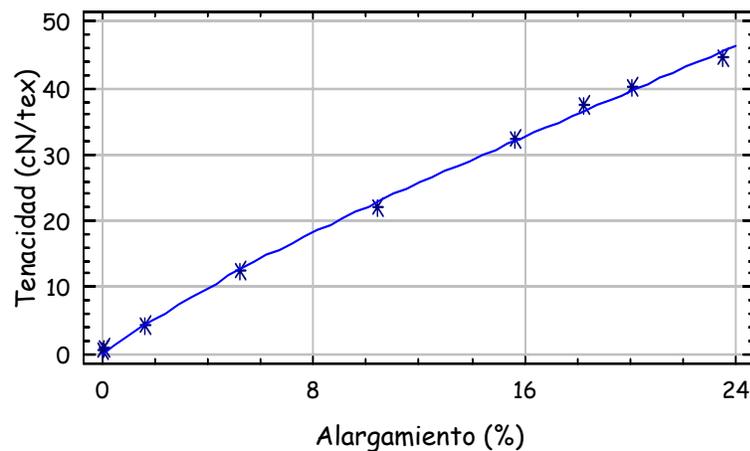
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 19)

Figura 57

Tabla 66 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe (Hilo 20)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	37,0422	11,3589	9,2478	64,8466
b	0,0738	0,0323	-0,0052	0,1528
c	0,0273	0,0106	0,0014	0,0533
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		6725,57	3	2241,86
Residual		3,3861	6	0,5643
Total		6728,96	9	
R ² ajustada		99,8206%		
Error estándar		0,7512		
Error medio absoluto		0,5326		

Tenacidad Vs. Alargamiento



Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe (Hilo 20)

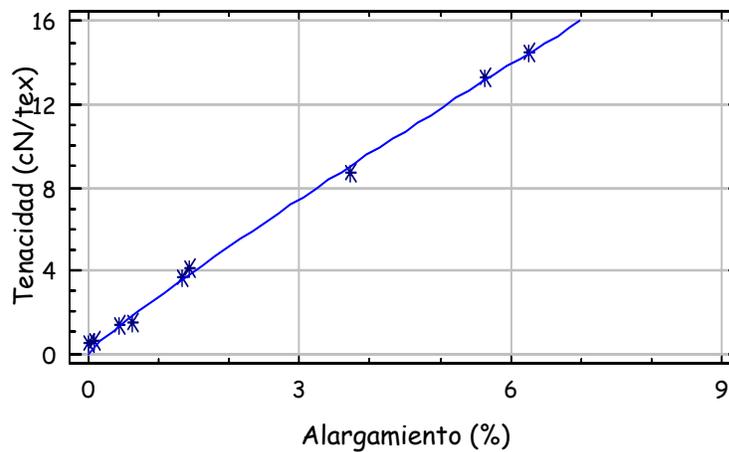
Figura 58

8.4 REGRESIÓN NO LINEAL DEL MODELO DE VANGHELUWE MODIFICADO CON CUATRO PARÁMETROS

Tabla 67 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 1)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	40,6069	14234,2	-36549,7	36631,0
b	0,0006	0,2522	-0,6478	0,6491
d	0,9103	0,6550	-1,2876	3,1084
c	2,7014	0,0000034	2,7014	2,7014
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		496,638	4	124,16
Residual		0,5913	5	0,1162
Total		497,219	9	
R ² ajustada		99,6127%		
Error estándar		0,3409		
Error medio absoluto		0,2119		

Tenacidad Vs. Alargamiento



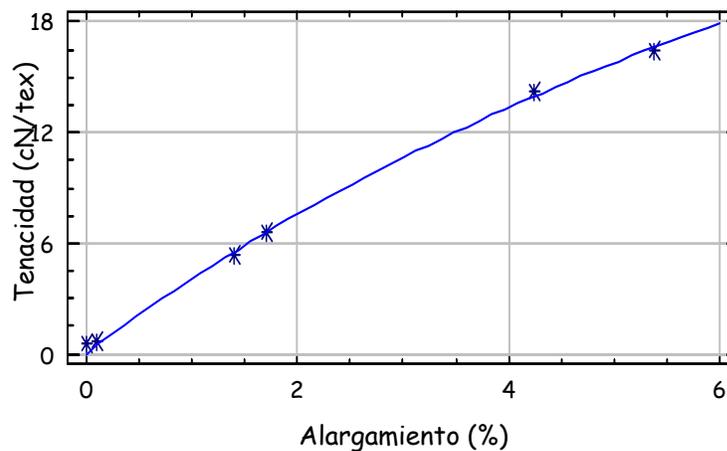
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 1)

Figura 59

Tabla 68 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 2)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	15,2998	151,594	-636,959	667,558
b	0,2092	1,4896	-6,2001	6,6187
d	1,0001	0,5000	-1,1512	3,1513
c	1,1727	10,4503	-43,7914	46,137
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		546,214	4	136,553
Residual		0,3876	2	0,1938
Total		546,601	6	
R ² ajustada		99,5112%		
Error estándar		0,4402		
Error medio absoluto		0,2190		

Tenacidad Vs. Alargamiento



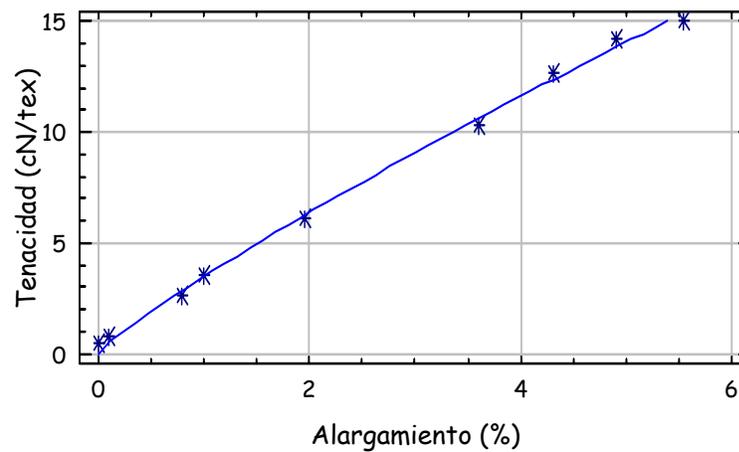
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 2)

Figura 60

Tabla 69 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 3)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	22,6851	7347,12	-18863,7	18909,1
b	0,0556	9,5807	-24,5726	24,6839
d	0,8909	0,4211	-0,1917	1,9735
c	2,2318	196,885	-503,878	508,34
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		752,784	4	188,196
Residual		0,8010	5	0,1602
Total		753,585	9	
R ² ajustada		99,5284%		
Error estándar		0,4002		
Error medio absoluto		0,2758		

Tenacidad Vs. Alargamiento



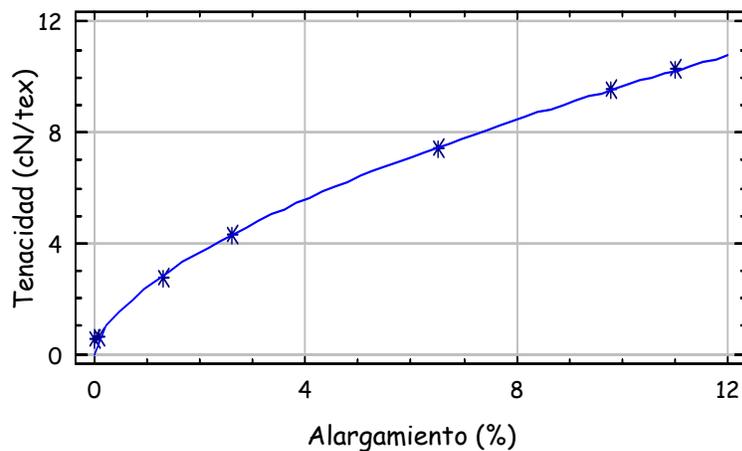
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 3)

Figura 61

Tabla 70 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 4)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	8,7922	3105,5	-9874,3	9891,89
b	0,0633	12,4608	-39,5925	39,7192
d	0,6134	0,2102	-0,0557	1,2827
c	1,8663	93,4994	-295,691	299,423
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		278,793	4	69,6983
Residual		0,1338	3	0,446
Total		278,927	7	
R ² ajustada		99,7303%		
Error estándar		0,2112		
Error medio absoluto		0,0766		

Tenacidad Vs. Alargamiento



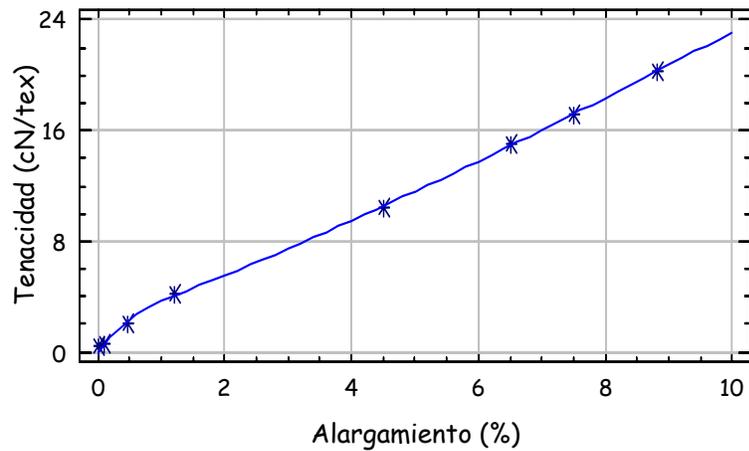
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 4)

Figura 62

Tabla 71 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 5)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2,3954	0,6361	0,6291	4,1616
b	2,8214	1,2023	-0,5167	6,1596
d	1,1711	0,0890	0,9238	1,4185
c	1,399	0,3090	0,5410	2,2569
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1062,87	4	265,716
Residual		0,2878	4	0,0719
Total		1063,15	8	
R ² ajustada		99,8871%		
Error estándar		0,2682		
Error medio absoluto		0,1376		

Tenacidad Vs. Alargamiento



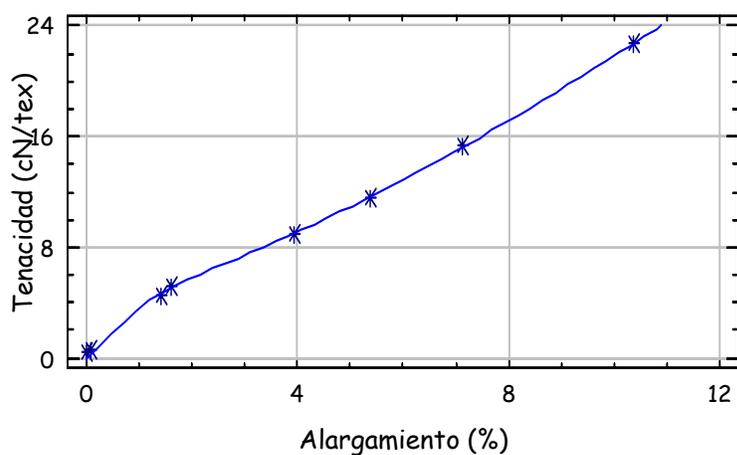
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 5)

Figura 63

Tabla 72 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 6)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	3,9430	1,3096	0,3069	7,5792
b	1,2188	0,8419	-1,1189	3,5565
d	1,3598	0,1685	0,8918	1,8278
c	0,7813	0,3563	-0,2079	1,7707
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1010,97	4	252,743
Residual		0,3518	4	0,0879
Total		1011,32	8	
R ² ajustada		99,8504%		
Error estándar		0,2965		
Error medio absoluto		0,1461		

Tenacidad Vs. Alargamiento



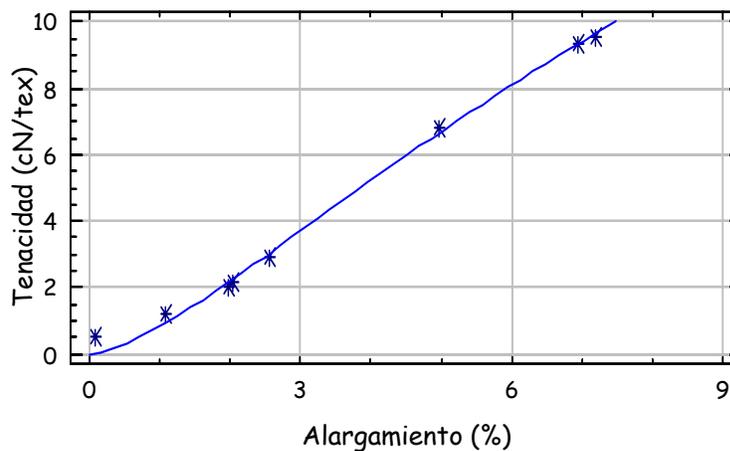
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 6)

Figura 64

Tabla 73 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 7)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	7,5651	46,8718	-122,572	137,702
b	0,0866	0,3893	-0,9943	1,1677
d	1,4728	0,6851	-0,4572	3,4029
c	0,1987	1,0679	-2,7662	3,1638
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		243,636	4	60,909
Residual		0,3380	4	0,0845
Total		243,974	8	
R ² ajustada		99,3791%		
Error estándar		0,2907		
Error medio absoluto		0,1552		

Tenacidad Vs. Alargamiento



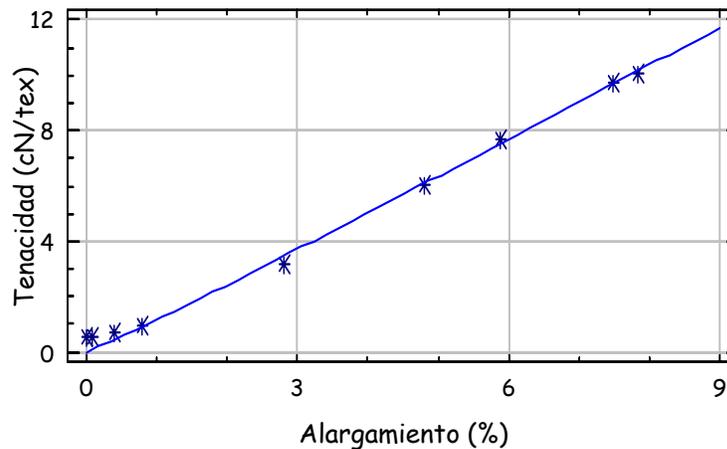
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 7)

Figura 65

Tabla 74 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 8)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	5,4836	1129,96	-2878,62	2889,59
b	0,0475	5,9916	-15,3544	15,4495
d	1,0794	0,5402	0,3092	2,4681
c	0,8902	24,1774	-61,2599	63,0404
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		303,721	4	75,9301
Residual		0,5791	5	0,1158
Total		304,3	9	
R ² ajustada		99,2954%		
Error estándar		0,3403		
Error medio absoluto		0,1932		

Tenacidad Vs. Alargamiento



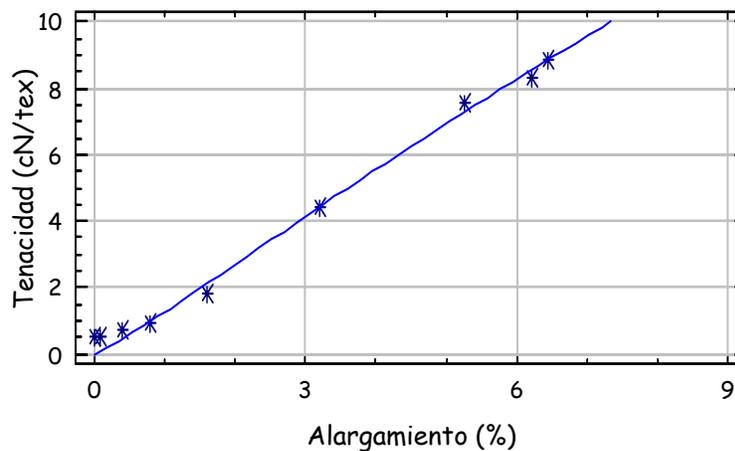
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 8)

Figura 66

Tabla 75 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 9)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	7,1757	216,361	-548,999	563,351
b	0,1034	2,0796	-5,2425	5,4493
d	1,1536	0,6383	-0,4880	2,7952
c	0,5404	8,1635	-20,4448	21,5257
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		229,865	4	57,446
Residual		0,7052	5	0,1410
Total		230,5702	9	
R ² ajustada		98,9185%		
Error estándar		0,3755		
Error medio absoluto		0,2237		

Tenacidad Vs. Alargamiento



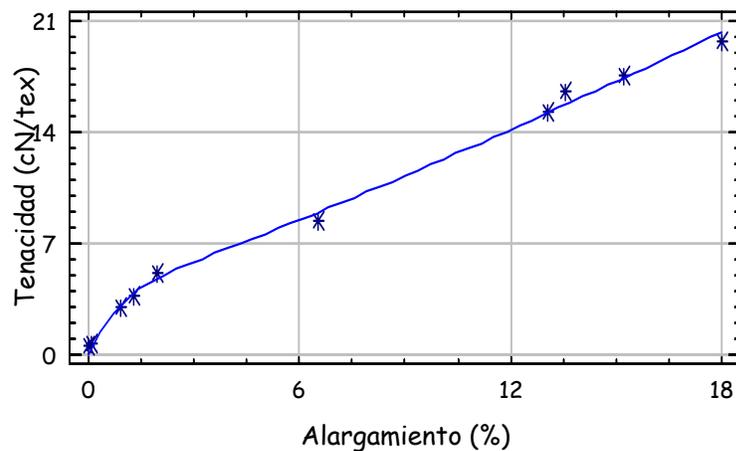
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 9)

Figura 67

Tabla 76 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 10)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	3,6719	1,4538	0,1145	7,2293
b	1,2445	0,8388	-0,8079	3,2970
d	1,1362	0,1993	0,6484	1,6240
c	0,6258	0,3972	-0,3463	1,5979
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1328,77	4	332,192
Residual		1,7998	6	0,2999
Total		1330,57	10	
R ² ajustada		99,4708%		
Error estándar		0,5476		
Error medio absoluto		0,3465		

Tenacidad Vs. Alargamiento



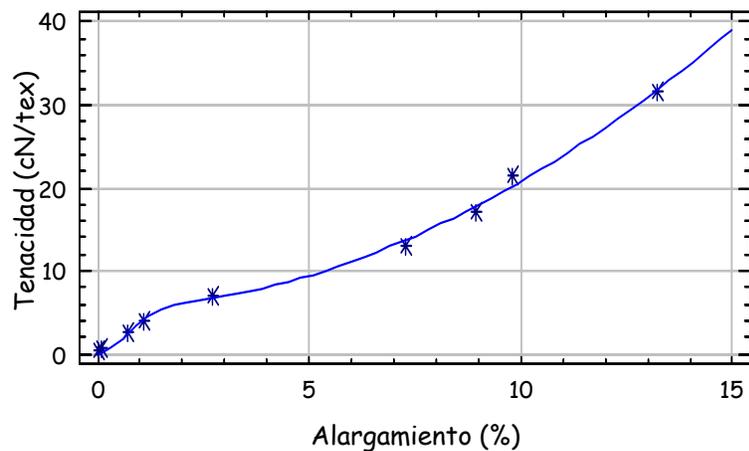
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 10)

Figura 68

Tabla 77 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 11)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	5,4175	1,0748	2,6544	8,1805
b	1,1261	0,4916	-0,1376	2,3899
d	1,9377	0,1905	1,4479	2,4274
c	0,1772	0,0919	-0,0590	0,4136
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1993,93	4	498,482
Residual		3,2601	5	0,6520
Total		1997,19	9	
R ² ajustada		99,4378%		
Error estándar		0,8074		
Error medio absoluto		0,5248		

Tenacidad Vs. Alargamiento



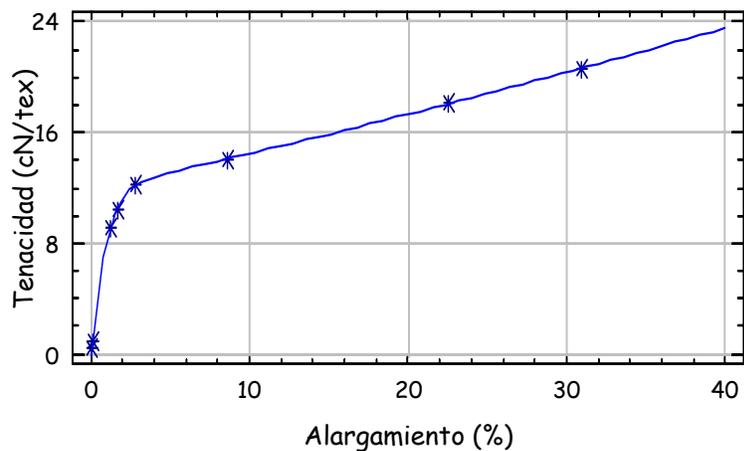
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 11)

Figura 69

Tabla 78 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 12)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	11,9909	0,2613	11,2651	12,1766
b	1,1026	0,0781	0,8856	1,3196
d	1,1113	0,0683	0,9216	1,3009
c	0,1916	0,0479	0,0585	0,3247
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1299,71	4	324,928
Residual		0,2050	4	0,0512
Total		1299,92	8	
R ² ajustada		99,9031%		
Error estándar		0,2264		
Error medio absoluto		0,0968		

Tenacidad Vs. Alargamiento



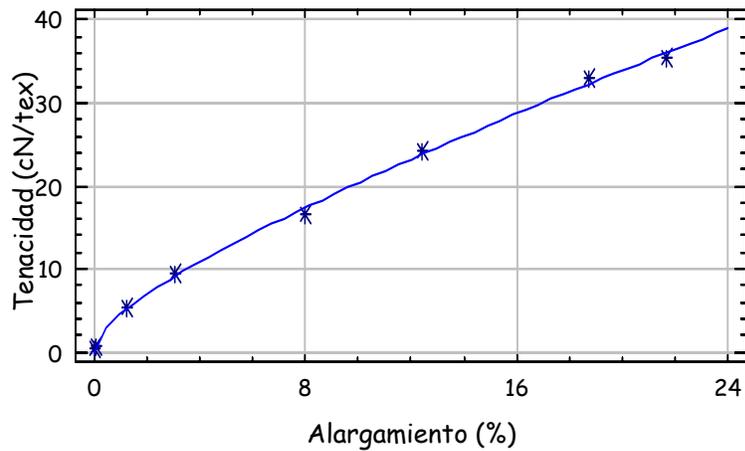
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 12)

Figura 70

Tabla 79 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 13)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2,1237	2,4716	-4,7386	8,9861
b	1,6388	2,5169	-5,3493	8,6269
d	0,8044	0,1054	0,5115	1,0973
c	2,8580	1,1201	-0,2521	5,9681
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		3322,14	4	830,535
Residual		1,5271	4	0,3817
Total		3323,67	8	
R ² ajustada		99,8044%		
Error estándar		0,6178		
Error medio absoluto		0,3794		

Tenacidad Vs. Alargamiento



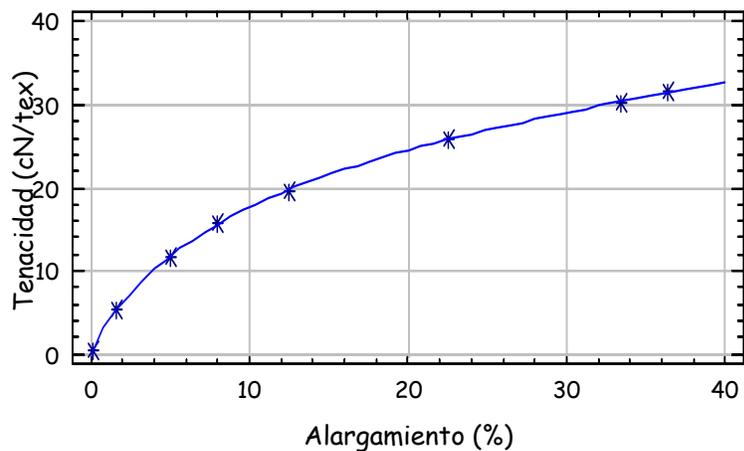
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 13)

Figura 71

Tabla 80 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 14)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	17,7482	1,3680	13,9498	21,5468
b	0,1836	0,0135	0,1461	0,2212
d	0,8539	0,0335	0,7608	0,9470
c	0,6546	0,0683	0,4649	0,8442
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		3381,72	4	845,431
Residual		0,0880	4	0,0220
Total		3381,81	8	
R ² ajustada		99,9831%		
Error estándar		0,1483		
Error medio absoluto		0,0789		

Tenacidad Vs. Alargamiento



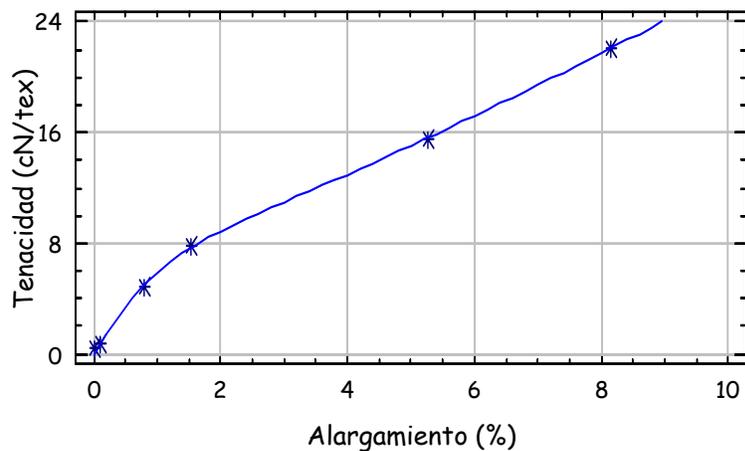
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 14)

Figura 72

Tabla 81 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 15)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	6,1147	1,3640	0,2457	11,9836
b	1,3785	0,4287	-0,4661	3,2233
d	1,1866	0,1682	0,4626	1,9106
c	1,3257	0,5630	-1,0970	3,7485
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		817,207	4	204,302
Residual		0,2762	2	0,1381
Total		817,484	6	
R ² ajustada		99,8149%		
Error estándar		0,3716		
Error medio absoluto		0,1656		

Tenacidad Vs. Alargamiento



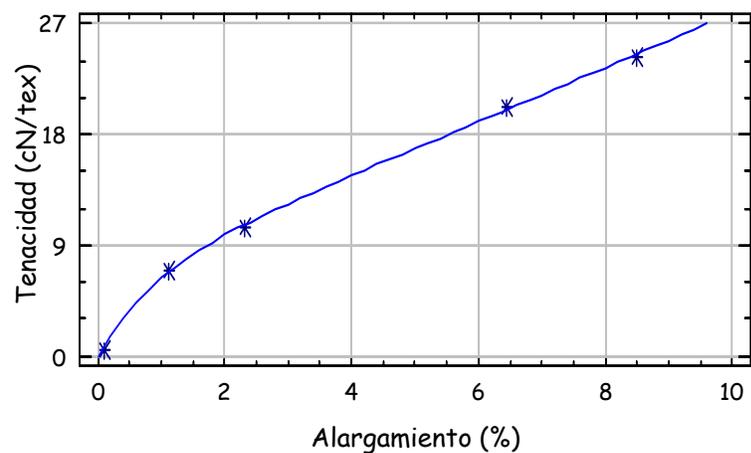
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 15)

Figura 73

Tabla 82 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 16)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	6,347	2,8381	-29,7147	42,4087
b	1,1408	0,6056	-6,5541	8,8357
d	1,0339	0,2715	-2,4159	4,4837
c	1,9925	1,4247	-16,1103	20,0954
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1163,76	4	290,939
Residual		0,3324	1	0,3324
Total		1164,09	5	
R ² ajustada		99,6505%		
Error estándar		0,5766		
Error medio absoluto		0,2525		

Tenacidad Vs. Alargamiento



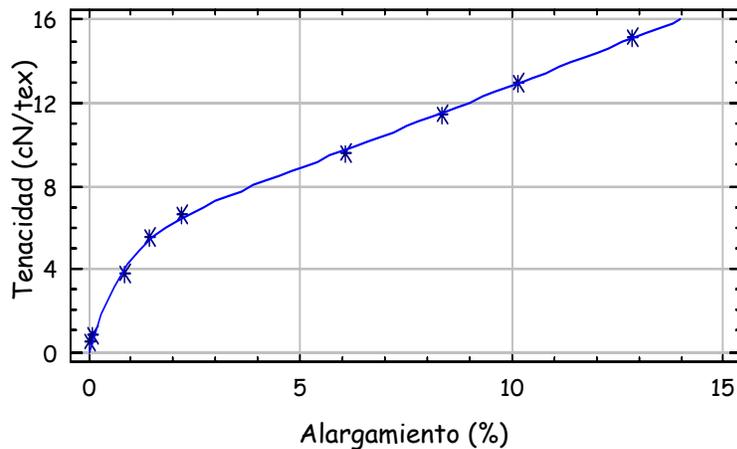
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 16)

Figura 74

Tabla 83 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 17)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	5,1168	0,5972	3,5815	6,6522
b	1,3186	0,2553	0,6543	1,9664
d	1,0310	0,1095	0,7494	1,3121
c	0,7177	0,2345	0,1147	1,3207
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		710,061	4	177,515
Residual		0,3209	5	0,0641
Total		710,382	9	
R ² ajustada		99,7662%		
Error estándar		0,2533		
Error medio absoluto		0,1457		

Tenacidad Vs. Alargamiento



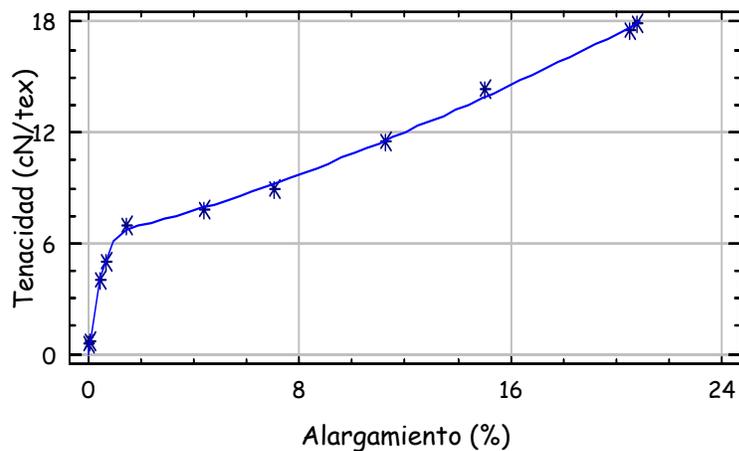
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 17)

Figura 75

Tabla 84 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 18)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	6,4552	0,3517	5,6234	7,2869
b	2,5334	0,3211	1,79239	3,3129
d	1,3211	0,1018	1,0703	1,5519
c	0,2145	0,0711	0,0464	0,3827
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1197,21	4	299,302
Residual		0,7980	7	0,1140
Total		1198,01	11	
R ² ajustada		99,6957%		
Error estándar		0,3376		
Error medio absoluto		0,2230		

Tenacidad Vs. Alargamiento



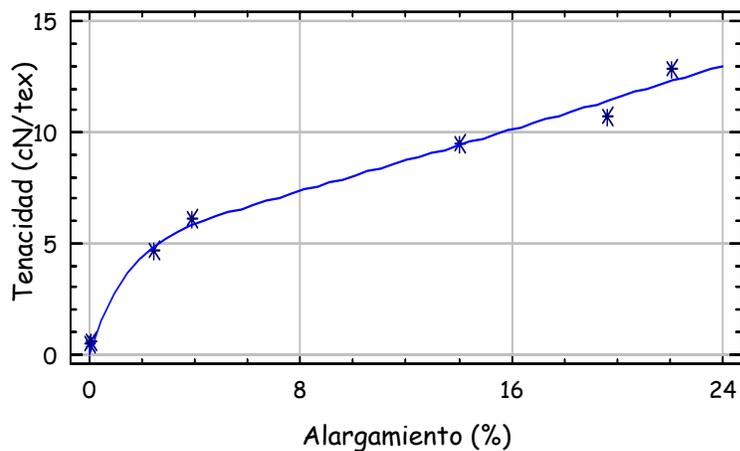
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 18)

Figura 76

Tabla 85 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 19)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	4,8197	1,9025	-1,2349	10,8745
b	0,7503	0,8813	-2,0545	3,5553
d	1,0672	0,4680	-0,4221	2,5566
c	0,2763	0,4642	-1,2012	1,7539
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		429,574	3	107,394
Residual		1,2928	4	0,4309
Total		430,867	7	
R ² ajustada		98,1799%		
Error estándar		0,6564		
Error medio absoluto		0,3647		

Tenacidad Vs. Alargamiento



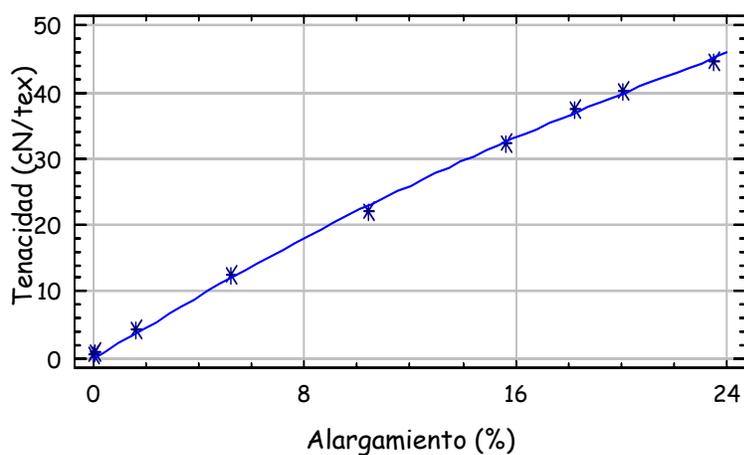
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 19)

Figura 77

Tabla 86 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 20)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	21,1951	30,5773	-57,4066	99,7967
b	0,0644	0,0782	-0,1366	0,2655
d	1,0927	0,2245	0,5155	1,6699
c	0,8494	0,4716	-0,3629	2,0619
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		6726,47	4	1681,62
Residual		2,4879	5	0,4975
Total		6728,96	9	
R ² ajustada		99,8419%		
Error estándar		0,7054		
Error medio absoluto		0,5016		

Tenacidad Vs. Alargamiento



Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cuatro parámetros (Hilo 20)

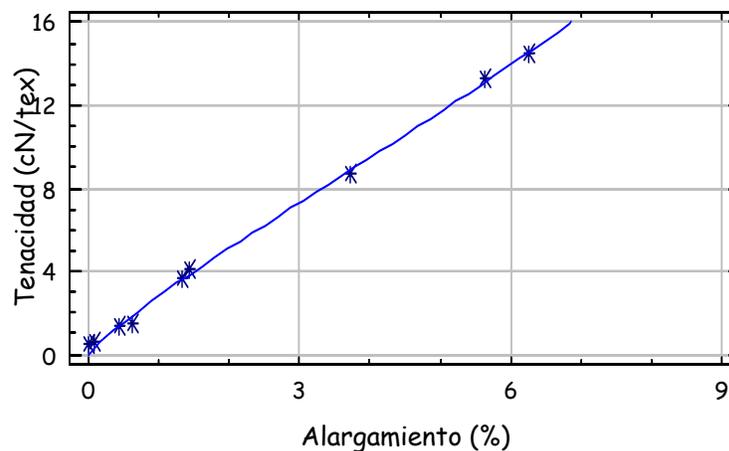
Figura 78

8.5 REGRESIÓN NO LINEAL DEL MODELO DE VANGHELUWE MODIFICADO CON CINCO PARÁMETROS

Tabla 87 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 1)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	6,3902	236,141	-649,245	662,0
b	0,4163	12,3666	-33,9188	34,75
e	0,8833	1,3627	-2,9002	4,666
c	0,6012	29,3527	-80,8951	82,09
d	1,4734	16,5036	-44,3481	47,2
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		496,682	5	99,3364
Residual		0,5374	4	0,1343
Total		497,219	9	
R ² ajustada		99,5524%		
Error estándar		0,3665		
Error medio absoluto		0,1924		

Tenacidad Vs. Alargamiento



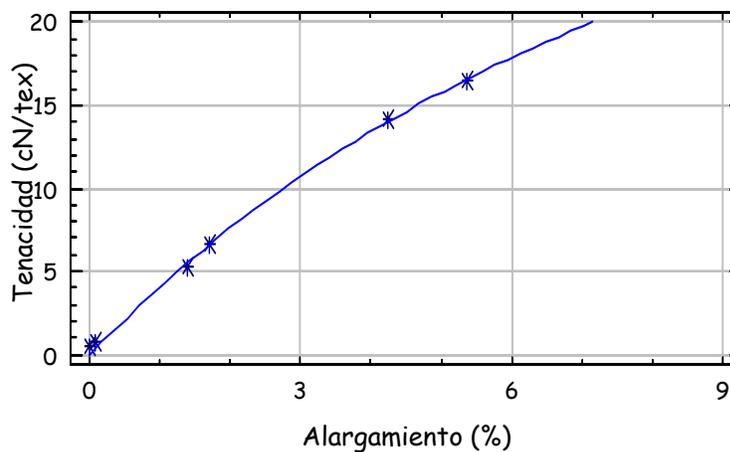
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 1)

Figura 79

Tabla 88 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 2)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	16,3726	6189,82	-78632,8	78665,5
b	0,2161	16,4836	-209,227	209,66
e	1,0443	45,8424	-589,439	583,528
c	0,8191	1001,46	-12723,9	12725,5
d	1,0647	304,383	-3866,48	3868,61
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		546,214	5	109,243
Residual		0,3877	1	0,3877
Total		546,601	6	
R ² ajustada		99,1421%		
Error estándar		0,6226		
Error medio absoluto		0,2092		

Tenacidad Vs. Alargamiento



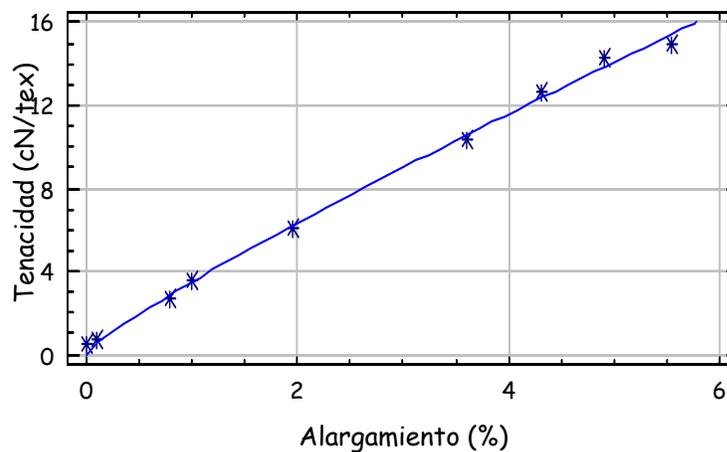
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 2)

Figura 80

Tabla 89 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 3)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	11,1409	2636,58	-7309,2	7331,48
b	0,2259	30,7818	-82,2382	85,6902
e	0,7774	15,9193	-43,4218	44,9768
c	1,2346	269,962	-748,302	750,771
d	1,1615	56,2539	-155,025	157,348
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		752,785	5	150,552
Residual		0,8001	4	0,2000
Total		753,585	9	
R ² ajustada		99,44112%		
Error estándar		0,4472		
Error medio absoluto		0,2707		

Tenacidad Vs. Alargamiento



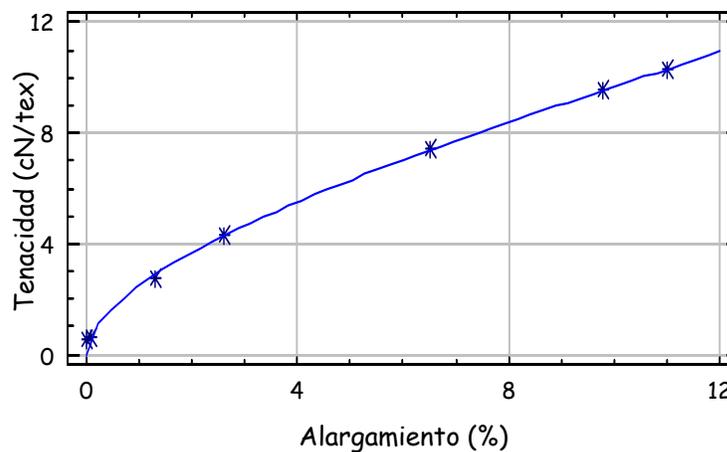
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 3)

Figura 81

Tabla 90 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 4)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	9,2910	775,346	-3326,75	3345,33
b	0,2845	24,2245	-103,945	104,514
e	0,6020	0,2219	-0,3530	1,5571
c	0,1756	28,5532	-122,679	123,03
d	1,2825	38,7981	-165,652	168,217
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		278,795	5	55,759
Residual		0,1317	2	0,0658
Total		278,927	7	
R ² ajustada		99,6019%		
Error estándar		0,2566		
Error medio absoluto		0,0848		

Tenacidad Vs. Alargamiento



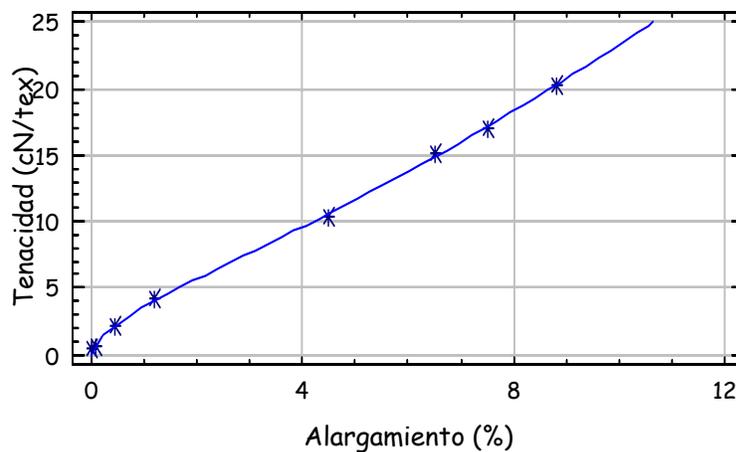
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 4)

Figura 82

Tabla 91 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 5)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	4,4395	10,4553	-28,8338	37,7129
b	0,9693	2,5348	-7,0978	9,0364
e	0,7444	0,2929	-0,1875	1,6765
c	0,8197	2,0048	-5,5606	7,2001
d	1,3634	0,8600	-1,3737	4,1004
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1062,9	5	212,581
Residual		0,2493	3	0,0831
Total		1063,15	8	
R ² ajustada		99,8696%		
Error estándar		0,2683		
Error medio absoluto		0,1412		

Tenacidad Vs. Alargamiento



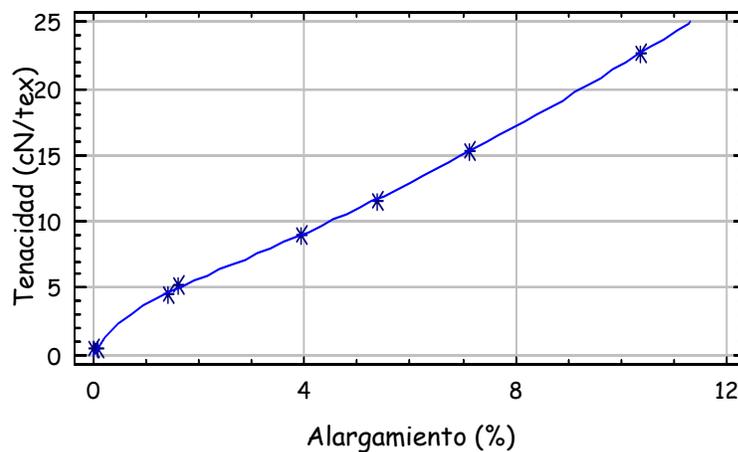
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 5)

Figura 83

Tabla 92 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 6)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	3,9293	2,2413	-3,2037	11,0625
b	1,3743	1,3593	-2,9517	5,7005
e	0,9433	0,2921	0,0236	1,8731
c	0,8000	0,5794	-1,0456	2,6456
d	1,3495	0,2591	0,5244	2,1742
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1011,08	5	202,217
Residual		0,2394	3	0,0798
Total		1011,32	8	
R ² ajustada		99,8642%		
Error estándar		0,2825		
Error medio absoluto		0,1210		

Tenacidad Vs. Alargamiento



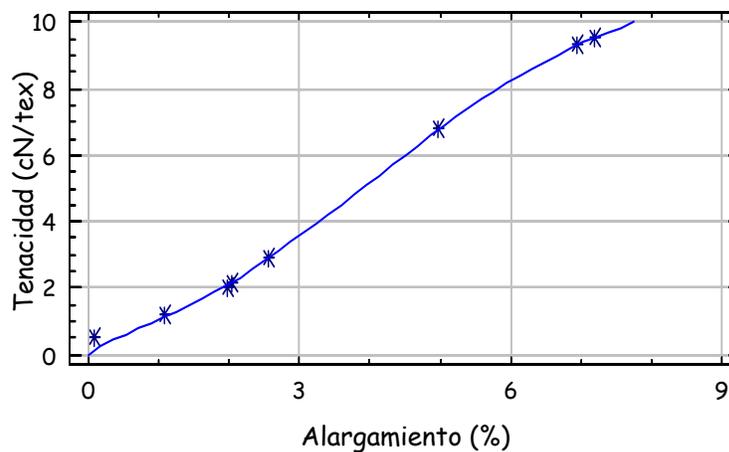
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 6)

Figura 84

Tabla 93 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 7)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	6,9993	12,8212	-33,8035	47,8021
b	0,0211	0,0414	-0,1107	0,1530
e	2,3312	1,4634	-2,3259	6,9884
c	0,8818	0,6753	-1,2674	3,0310
d	0,6841	0,8178	-1,9186	3,2869
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		243,861	5	48,7722
Residual		0,1129	3	0,0376
Total		243,974	8	
R ² ajustada		99,7234%		
Error estándar		0,1940		
Error medio absoluto		0,0717		

Tenacidad Vs. Alargamiento



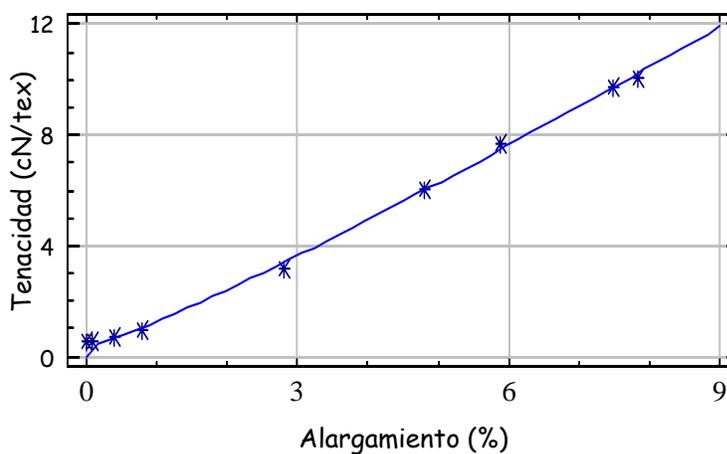
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 7)

Figura 85

Tabla 94 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 8)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	3,2858	1524,21	-4228,62	4235,19
b	0,0742	28,6507	-79,4727	79,6212
e	-0,1841	3,1698	-8,9849	8,6167
c	1,0090	0,3650	-0,0045	2,0225
d	1,1176	0,1323	0,7502	1,4850
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		304,187	5	60,8374
Residual		0,1125	4	0,0281
Total		304,3	9	
R ² ajustada		99,8288%		
Error estándar		0,1677		
Error medio absoluto		0,0930		

Tenacidad Vs. Alargamiento



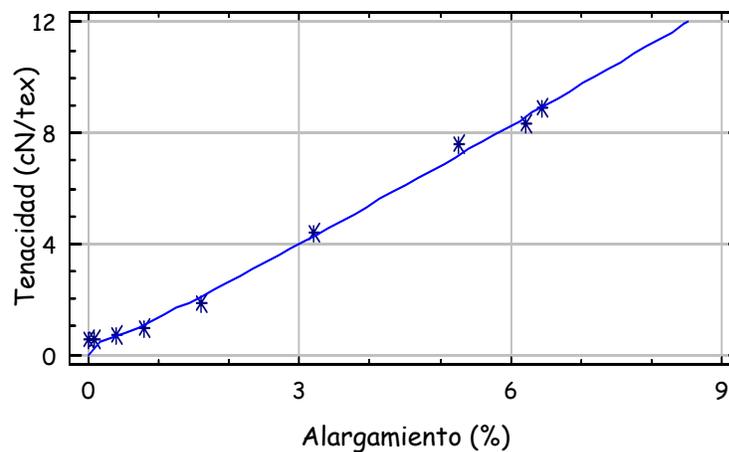
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 8)

Figura 86

Tabla 95 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 9)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	0,5583	2,7040	-6,9493	8,0660
b	0,2127	0,5041	-1,1868	1,6124
e	-0,5591	2,7087	-8,0799	6,9616
c	1,2149	0,4030	0,0958	2,3339
d	1,0683	0,1584	0,6285	1,5081
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		230,23	5	46,046
Residual		0,3403	4	0,0850
Total		230,57	9	
R ² ajustada		99,3475%		
Error estándar		0,2916		
Error medio absoluto		0,1600		

Tenacidad Vs. Alargamiento



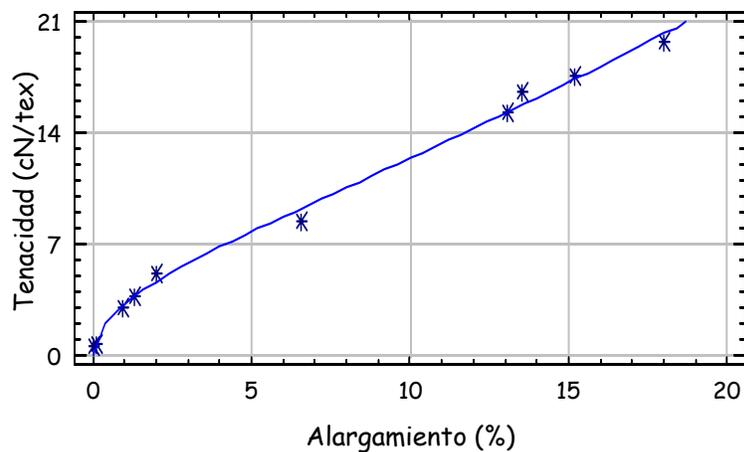
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 9)

Figura 87

Tabla 96 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 10)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	10,9179	135,236	-336,718	358,554
b	0,3224	4,5353	-11,3361	11,981
e	0,5506	0,5386	-0,8339	1,9352
c	0,1772	2,7902	-6,9954	7,3498
d	1,4469	3,7950	-8,3085	11,2024
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1328,55	5	265,709
Residual		2,0197	5	0,4039
Total		1330,57	10	
R ² ajustada		99,2874%		
Error estándar		0,6355		
Error medio absoluto		0,3599		

Tenacidad Vs. Alargamiento



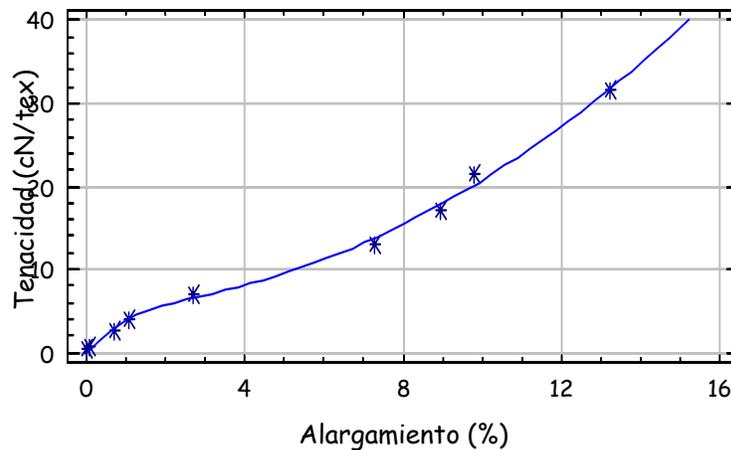
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 10)

Figura 88

Tabla 97 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 11)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	5,5454	2,1556	-0,4396	11,5306
b	1,0416	0,8425	-1,2477	3,3811
e	1,2011	0,9853	-1,5347	3,9370
c	0,1725	0,1493	-0,2421	0,5872
d	1,9458	0,3032	1,1039	2,7878
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1994,25	5	398,85
Residual		2,9398	4	0,7349
Total		1997,19	9	
R ² ajustada		99,3663%		
Error estándar		0,8572		
Error medio absoluto		0,4622		

Tenacidad Vs. Alargamiento



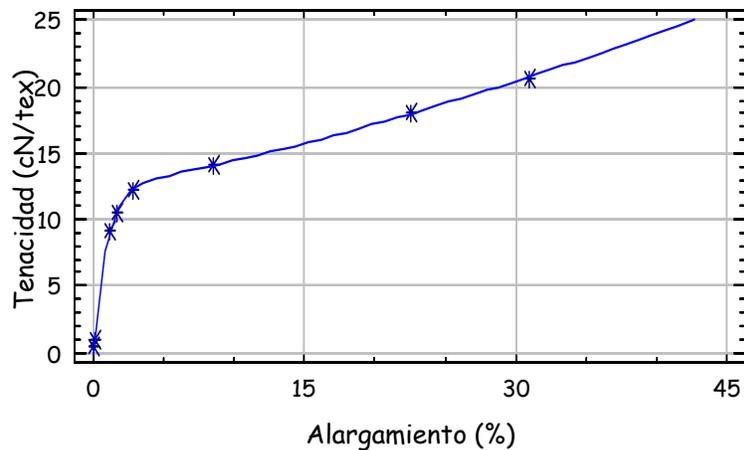
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 11)

Figura 89

Tabla 98 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 12)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	12,4668	0,7239	10,1628	14,7708
b	1,0399	0,1151	0,6733	1,4064
e	1,0759	0,1098	0,7262	1,4256
c	0,1015	0,1014	-0,2214	0,4244
d	1,2826	0,2749	0,4076	2,1575
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1299,68	5	258,936
Residual		0,2375	3	0,0791
Total		1299,92	8	
R ² ajustada		99,8504%		
Error estándar		0,2814		
Error medio absoluto		0,1287		

Tenacidad Vs. Alargamiento



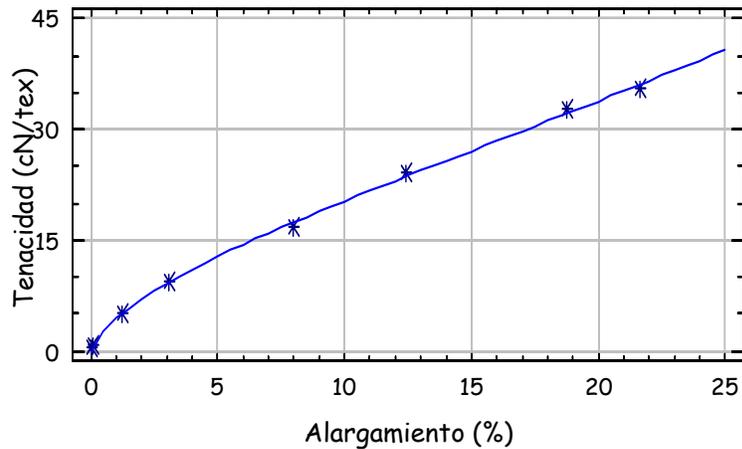
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 12)

Figura 90

Tabla 99 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 13)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	22,7879	328,426	-1022,41	1062,99
b	0,2027	3,1296	-9,7573	10,1628
e	0,7204	0,3235	-0,3091	1,7500
c	0,1767	7,0513	7,0513	22,6174
d	1,4828	9,4229	9,4229	31,4707
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		3321,53	5	664,305
Residual		2,1408	3	0,7136
Total		3323,67	8	
R ² ajustada		99,6344%		
Error estándar		0,8447		
Error medio absoluto		0,4418		

Tenacidad Vs. Alargamiento



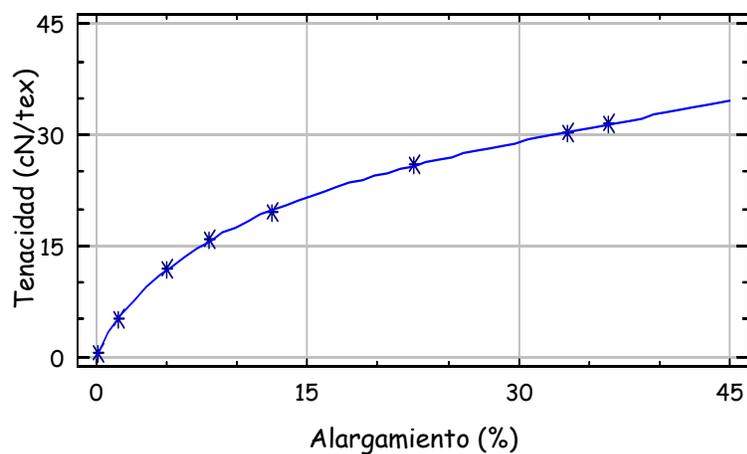
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 13)

Figura 91

Tabla 100 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 14)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	24,3411	29,0499	-68,1089	116,791
b	0,1593	0,1560	-0,3372	0,6559
e	0,8378	0,0372	0,7193	0,9564
c	0,0657	0,9514	-2,9621	3,0937
d	1,3398	3,1795	-8,77990	11,4587
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		3381,71	5	676,343
Residual		0,0964	3	0,0321
Total		3381,81	8	
R ² ajustada		99,9753%		
Error estándar		0,1793		
Error medio absoluto		0,0825		

Tenacidad Vs. Alargamiento



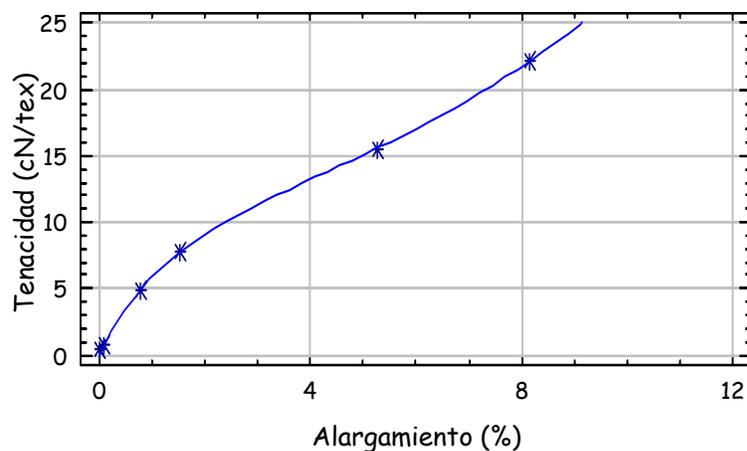
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 14)

Figura 92

Tabla 101 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 15)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	11,7899	25,0037	-305,912	329,492
b	0,6600	1,7448	-21,5108	22,8308
e	0,9687	0,3839	-3,9097	5,8471
c	0,13331	1,8819	-23,77	24,0453
d	2,0779	5,3644	-66,0842	770,2401
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		817,308	5	163,462
Residual		0,1754	1	0,1754
Total		817,484	6	
R ² ajustada		99,7648%		
Error estándar		0,4189		
Error medio absoluto		0,0953		

Tenacidad Vs. Alargamiento



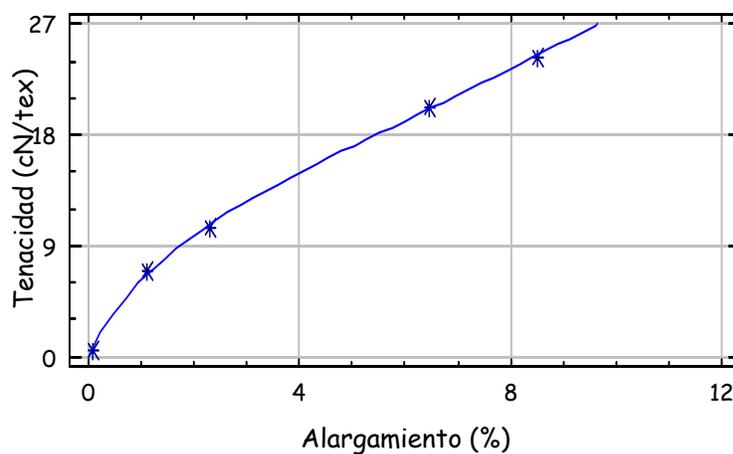
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 15)

Figura 93

Tabla 102 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 16)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	10,6098	0	10,6098	10,6098
b	0,6910	0	0,6910	0,6910
e	0,9297	0	0,9297	0,9297
c	1,3146	0	0,8371	0,8371
d	1163,61	0	1,3146	1,3146
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1163,61	5	232,722
Residual		0,4795	0	0
Total		1164,09	5	
R ² ajustada		100%		
Error estándar		0		
Error medio absoluto		0,2919		

Tenacidad Vs. Alargamiento



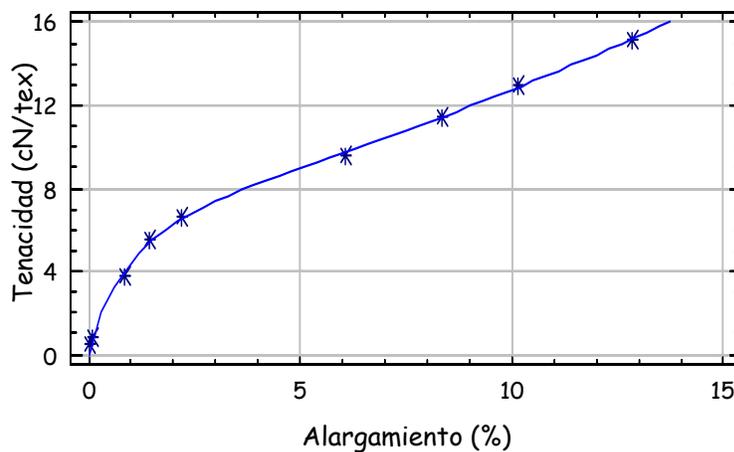
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 16)

Figura 94

Tabla 103 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 17)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	6,8426	2,6514	-0,5189	14,2042
b	0,9429	0,4695	-0,3607	2,2465
e	0,8682	0,1499	0,4519	1,2845
c	0,2479	0,4644	-1,0415	1,5374
d	1,3776	0,6106	-0,3179	3,0731
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		710,135	5	142,027
Residual		0,2471	4	0,0617
Total		710,382	9	
R ² ajustada		99,7749%		
Error estándar		0,2485		
Error medio absoluto		0,1287		

Tenacidad Vs. Alargamiento



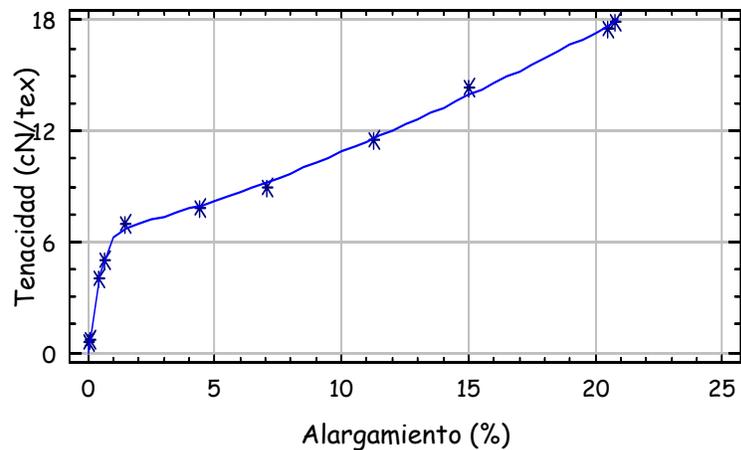
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 17)

Figura 95

Tabla 104 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 18)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	6,4321	0,5228	5,1526	7,7116
b	2,5998	0,8196	0,5942	4,6054
e	1,3292	0,2933	0,6112	2,0471
c	0,2194	0,1066	-0,0416	0,4804
d	1,3043	0,1476	0,9429	1,6657
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1197,21	5	239,442
Residual		0,7973	6	0,1328
Total		1198,01	11	
R ² ajustada		99,6453%		
Error estándar		0,3645		
Error medio absoluto		0,2223		

Tenacidad Vs. Alargamiento



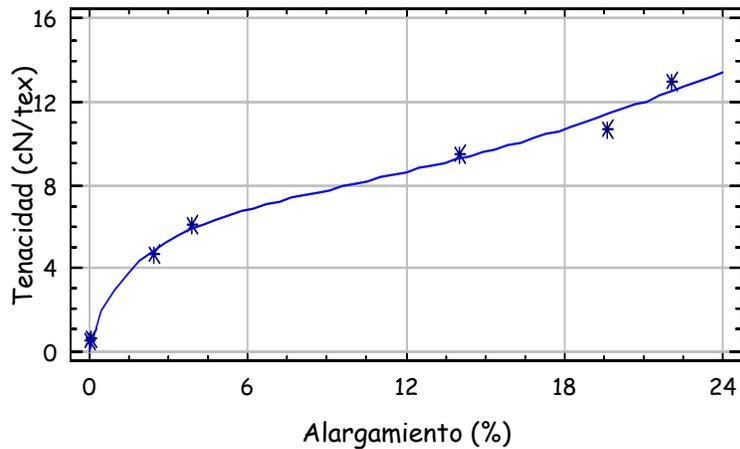
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 18)

Figura 96

Tabla 105 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 19)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	7,0769	9,9243	-35,6239	49,7777
b	0,5525	1,1483	-4,3882	5,4934
e	0,7904	0,4999	-1,3606	2,9416
c	0,0143	0,2317	-0,9827	1,0115
d	1,9176	4,4109	-17,0611	20,8963
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		429,961	5	85,9922
Residual		0,9060	2	0,4530
Total		430,863	7	
R ² ajustada		98,0867%		
Error estándar		0,6730		
Error medio absoluto		0,2983		

Tenacidad Vs. Alargamiento



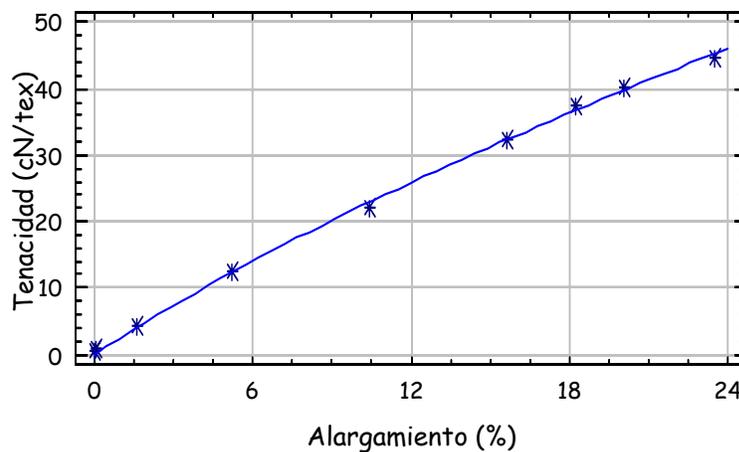
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 19)

Figura 97

Tabla 106 Regresión no lineal del modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 20)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	31,7088	725,283	-1982,01	2045,42
b	0,0736	1,1642	-3,1587	3,3060
e	0,9975	1,3044	-2,6241	4,6193
c	0,2033	18,3599	-50,772	51,1787
d	1,4434	20,4133	-52,2333	58,1207
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		6276,6	5	1345,32
Residual		2,3568	4	0,5892
Total		6728,96	9	
R ² ajustada		99,8127%		
Error estándar		0,7676		
Error medio absoluto		0,4417		

Tenacidad Vs. Alargamiento



Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Vangheluwe modificado con cinco parámetros (Hilo 20)

Figura 98

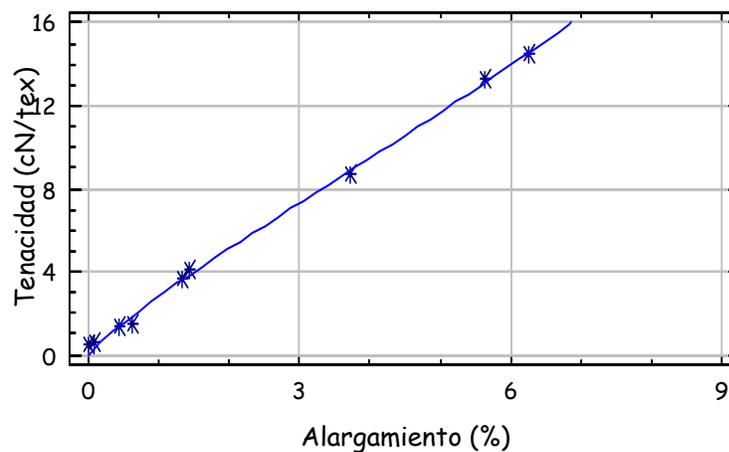
8.5 REGRESIÓN NO LINEAL DEL MODELO DE ZUREK

TABLA 107 Parámetros estimados del modelo de Zurek

No. Hilo	a	b	c	u	R ² (%)
1	2.4521	-1.1787	1.3172	0.5072	99.6343
2	2.3959	0.2961	1.9853	0.1995	99.522
3	2.1669	0.3645	1.3426	0.1581	99.4876
4	0.6592	3.0883	0.0959	0.7227	99.3127
5	2.3151	-0.1344	3.9962	1.0193	99.905
6	2.3755	-2.0008	4.1574	0.6205	99.9012
7	1.0623	2.9923	-1.6477	0.3814	99.4262
8	1.3081	-0.3240	-0.0183	0.0210	99.2514
9	1.1332	2.0638	-0.9774	0.4352	98.9847
10	1.0126	2.09257	2.4837	0.7384	99.5602
11	3.9190	-21.1015	9.3446	0.3696	99.6058
12	0.2985	11.4246	4.1527	0.7181	99.8783
13	1.3938	6.1235	-0.0202	0.6466	99.6954
14	0.4149	16.543	-0.0017	0.1780	99.9181
15	3.3065	-7.1994	7.4663	0.4109	99.879
16	2.1692	6.0863	-0.0160	1.1317	99.6424
17	0.8346	4.4473	2.6866	0.7474	99.8154
18	0.6551	4.2611	7.1914	0.8528	99.8092
19	0.7142	-4.7185	2.8240	0.1725	98.6819
20	1.5174	-0.5283	1.0246	0.0374	99.8668

Tabla 108 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 1)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2.4521	2.8944	-4.9882	9.8926
b	-1.1787	26.0941	-68.2559	65.8985
c	1.3172	7.0167	-16.7199	19.3544
u	0.5072	2.2995	-5.4039	6.4183
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		496.132	4	124.033
Residual		0.5486	5	0.1097
Total		496.68	9	
R ² ajustada		99.6343%		
Error estándar		0.3312		
Error medio absoluto		0.1946		

Tenacidad Vs. Alargamiento

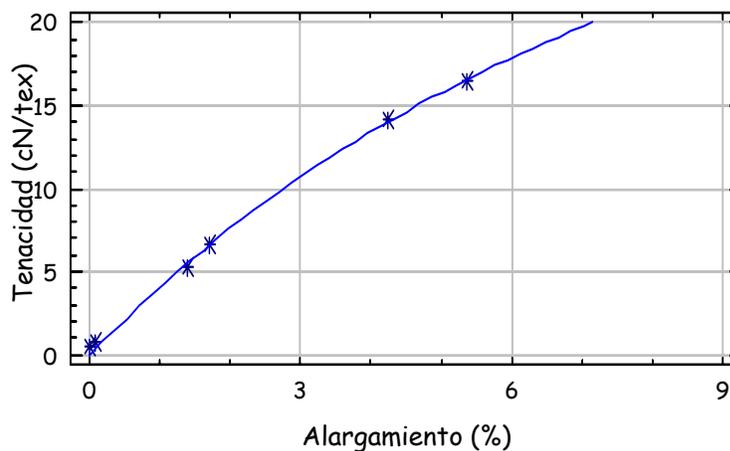
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 1)

Figura 99

Tabla 109 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 2)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2.3959	184.956	-793.956	798.197
b	0.2961	3106.56	-13366.1	13366.7
c	1.9853	488.345	-2099.19	2103.16
u	0.1995	19.0886	-81.9322	82.3314
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		545.929	4	136.482
Residual		0.4322	2	0.2161
Total		546.361	6	
R ² ajustada		99.522%		
Error estándar		0.4648		
Error medio absoluto		0.2398		

Tenacidad Vs. Alargamiento



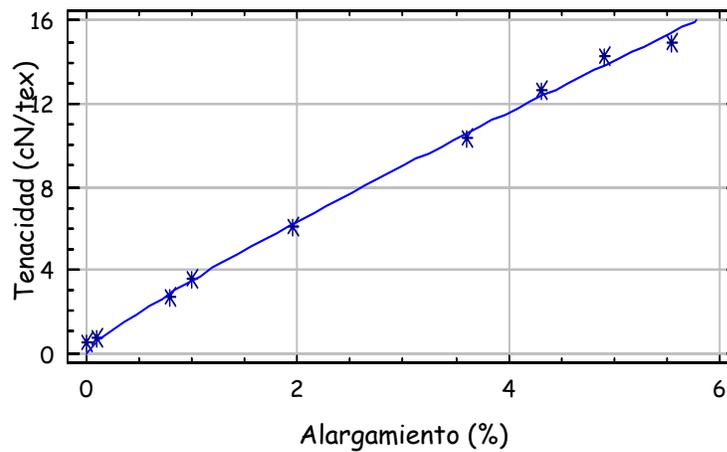
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 2)

Figura 100

Tabla 110 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 3)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2.1669	145.684	-372.328	376.662
b	0.3645	3105.39	-7982.31	7983.03
c	1.3426	354.005	-908.66	911.345
u	0.1581	12.9869	-33.2259	33.5422
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		752.722	4	188.181
Residual		0.8702	5	0.1740
Total		753.592	9	
R ² ajustada		99.4876%		
Error estándar		0.4171		
Error medio absoluto		0.2853		

Tenacidad Vs. Alargamiento



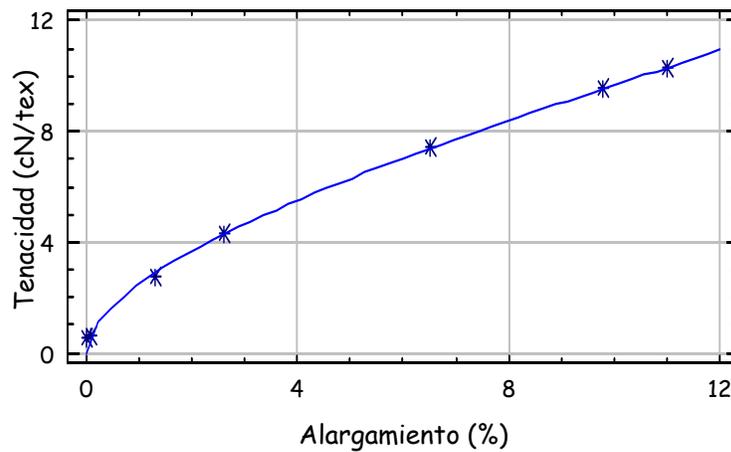
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 3)

Figura 101

Tabla 111 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 4)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	0.6592	0.1854	0.0690	1.2495
b	3.0883	1.9221	-3.0287	9.2054
c	0.0959	33.0369	-105.042	105.234
u	0.7227	10.843	-33.7844	35.23
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		278.643	4	69.6608
Residual		0.3419	3	0.1139
Total		278.985	7	
R ² ajustada		99.3127%		
Error estándar		0.3376		
Error medio absoluto		0.14700		

Tenacidad Vs. Alargamiento



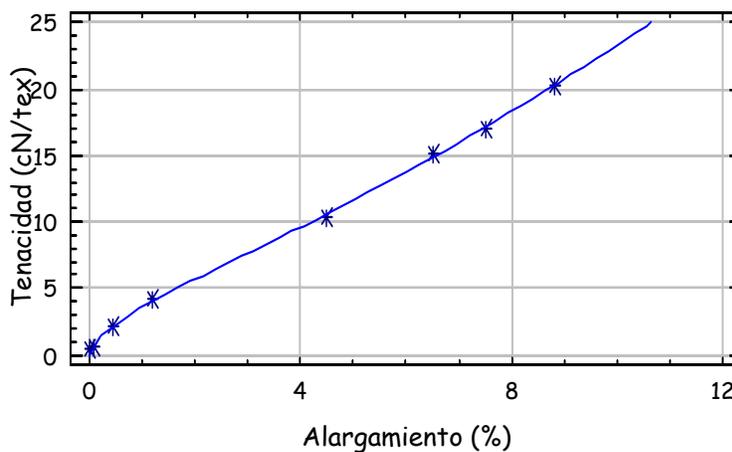
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 4)

Figura 102

Tabla 112 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 5)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2.3151	0.1271	1.9620	2.6683
b	-0.1344	0.9888	-2.8801	2.6111
c	3.9962	1.1270	0.8669	7.1255
u	1.0193	0.4357	-0.1904	2.2291
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1062.91	4	265.728
Residual		0.2421	4	0.0605
Total		1063.15	8	
R ² ajustada		99.905%		
Error estándar		0.2460		
Error medio absoluto		0.1120		

Tenacidad Vs. Alargamiento



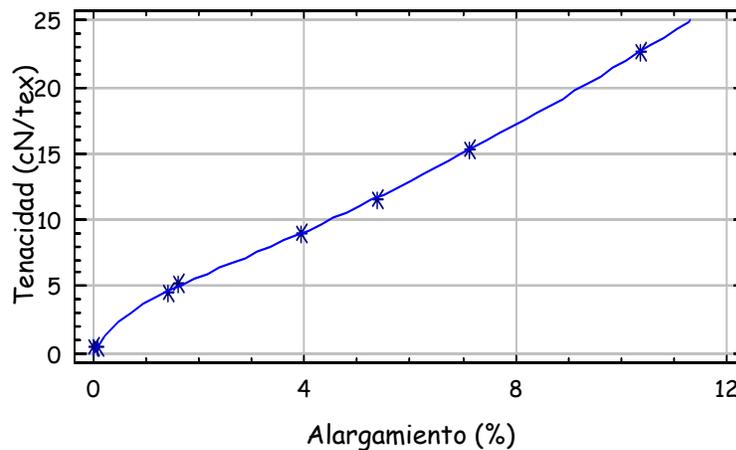
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 5)

Figura 103

Tabla 113 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 6)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2.3755	0.2264	1.7467	3.0042
b	-2.0008	2.4068	-8.6832	4.6815
c	4.1574	0.6809	2.2669	6.0479
u	0.6205	0.2376	-0.0393	1.2804
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1010.78	4	252.695
Residual		0.2324	4	0.0581
Total		1011.01	8	
R ² ajustada		99.9012%		
Error estándar		0.2410		
Error medio absoluto		0.0910		

Tenacidad Vs. Alargamiento



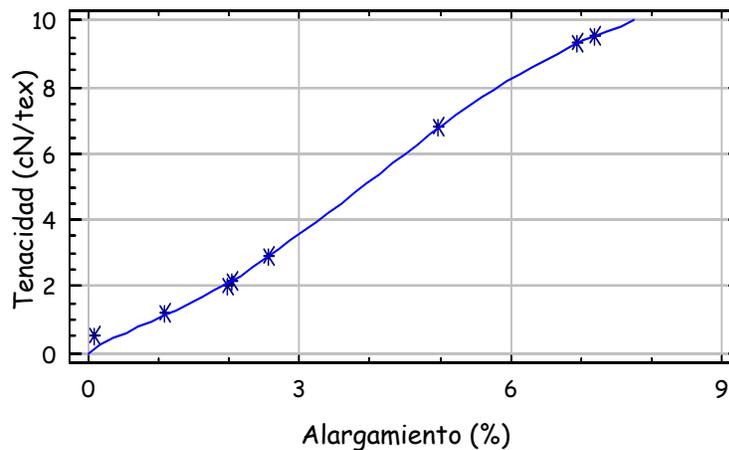
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 6)

Figura 104

Tabla 114 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 7)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1.0623	3.1613	-7.7148	9.8396
b	2.9923	36.4463	-98.199	104.184
c	-1.6477	6.1814	-18.8103	15.5149
u	0.3814	1.3294	-3.3096	4.0725
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		243.646	4	60.9115
Residual		0.3125	4	0.0781
Total		243.959	8	
R ² ajustada		99.4262%		
Error estándar		0.2795		
Error medio absoluto		0.1555		

Tenacidad Vs. Alargamiento



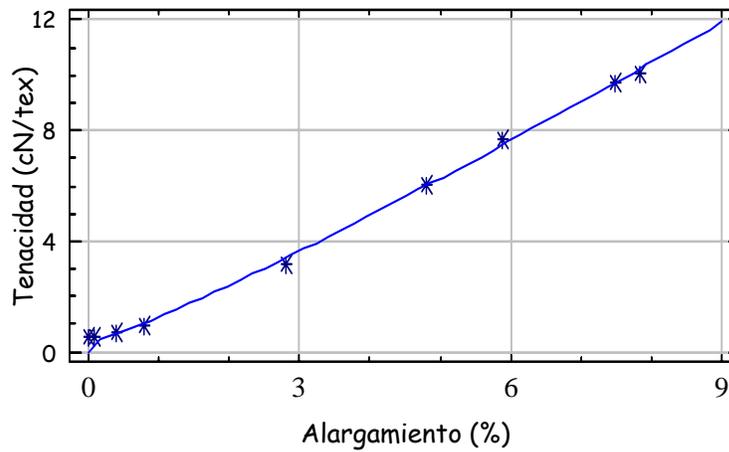
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 7)

Figura 105

Tabla 115 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 8)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1.3081	185.094	-474.493	477.109
b	-0.3240	21078.3	-54184.1	54183.4
c	-0.0183	198.333	-509.85	509.813
u	0.0210	0.000011	0.02099	0.0210
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		303.677	4	75.9193
Residual		0.6151	5	0.1230
Total		304.292	9	
R ² ajustada		99.2514%		
Error estándar		0.3507		
Error medio absoluto		0.2059		

Tenacidad Vs. Alargamiento

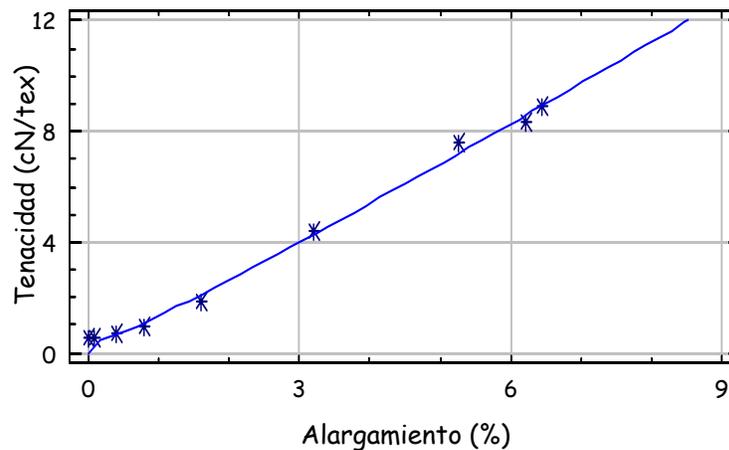


Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 8)

Figura 106

Tabla 116 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 9)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1.1332	3.7828	-8.5909	10.8574
b	2.0638	37.7436	-94.9594	99.087
c	-0.9774	6.3345	-17.261	15.3061
u	0.4352	3.0098	-7.3017	8.1722
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		229.894	4	57.4736
Residual		0.6620	5	0.1324
Total		230.556	9	
R ² ajustada		98.9847%		
Error estándar		0.3638		
Error medio absoluto		0.2158		

Tenacidad Vs. Alargamiento

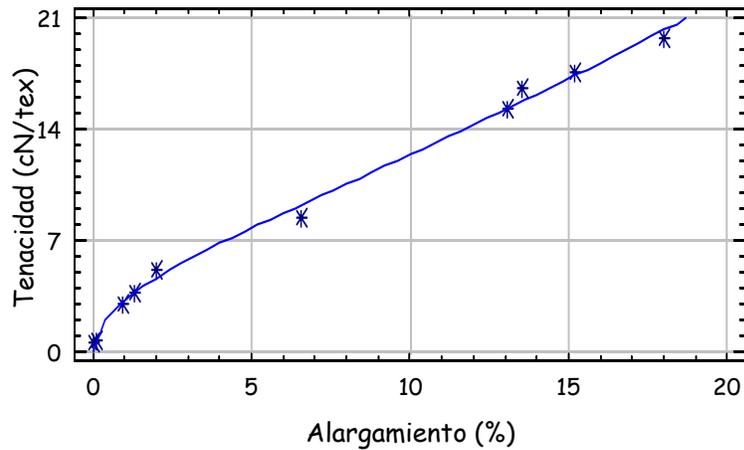
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 9)

Figura 107

Tabla 117 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 10)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1.0126	0.0848	0.8051	1.2201
b	2.0925	1.2397	-0.9408	5.1260
c	2.4837	1.1781	-0.3990	5.3666
u	0.7384	0.6560	-0.8668	2.3436
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1328.37	4	332.093
Residual		1.4951	6	0.2491
Total		1329.87	10	
R ² ajustada		99.5602%		
Error estándar		0.4991		
Error medio absoluto		0.3207		

Tenacidad Vs. Alargamiento



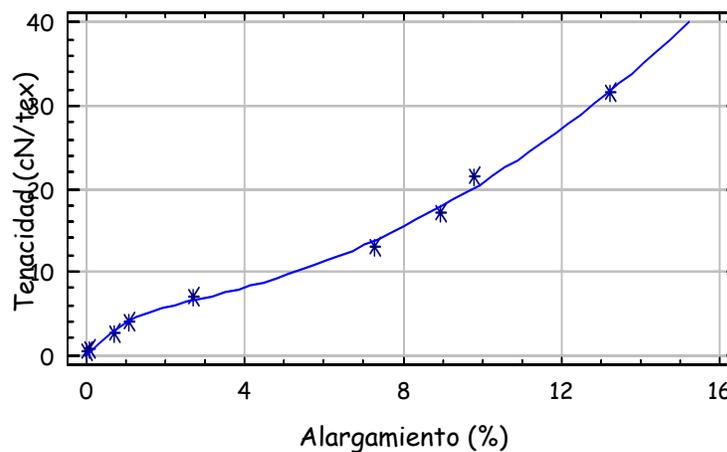
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 10)

Figura 108

Tabla 118 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 11)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	3.9190	0.7424	2.0106	5.8274
b	-21.1015	11.256	-50.0359	7.8329
c	9.3446	1.3608	5.8465	12.8427
u	0.3696	0.1244	0.0496	0.6895
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1993.99	4	498.498
Residual		2.2853	5	0.4570
Total		1996.28	9	
R ² ajustada		99.6058%		
Error estándar		0.6760		
Error medio absoluto		0.4241		

Tenacidad Vs. Alargamiento



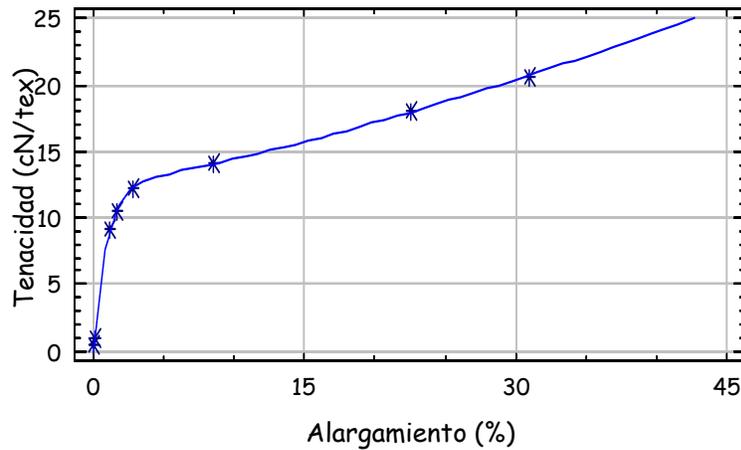
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 11)

Figura 109

Tabla 119 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 12)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	0.2985	0.0178	0.2489	0.3480
b	11.4246	0.4209	10.2558	12.5934
c	4.1527	1.1118	1.0656	7.2398
u	0.7181	0.1459	0.3130	1.1232
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1299.68	4	324.92
Residual		0.2576	4	0.0644
Total		1299.94	8	
R ² ajustada		99.8783%		
Error estándar		0.2538		
Error medio absoluto		0.1235		

Tenacidad Vs. Alargamiento



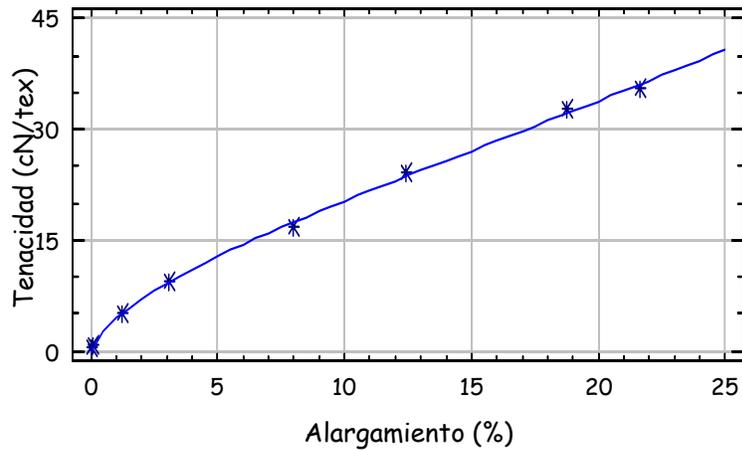
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 12)

Figura 110

Tabla 120 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 13)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1.3938	0.0906	1.1420	1.6456
b	6.1235	1.5594	1.7937	10.4533
c	-0.0202	494.262	-1372.32	1372.28
u	0.6466	80.4643	-222.759	224.052
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		3320.48	4	830.12
Residual		2.3783	4	0.5945
Total		3322.86	8	
R ² ajustada		99.6954%		
Error estándar		0.7710		
Error medio absoluto		0.4818		

Tenacidad Vs. Alargamiento



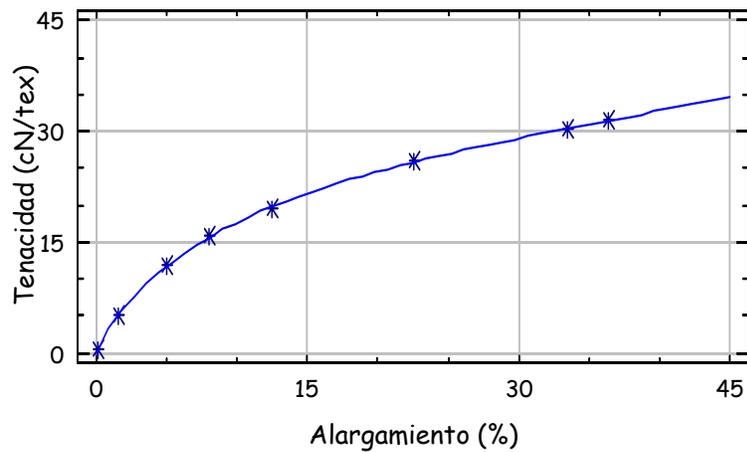
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 13)

Figura 111

Tabla 121 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 14)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	0.4149	0.0749	0.2070	0.6229
b	16.543	2.7455	8.9202	24.1658
c	-0.0017	151.082	-419.475	419.472
u	0.1780	9.1223	-25.1497	25.5059
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		3386.97	4	846.742
Residual		0.4274	4	0.1068
Total		3387.4	8	
R ² ajustada		99.91%		
Error estándar		0.3268		
Error medio absoluto		0.1886		

Tenacidad Vs. Alargamiento



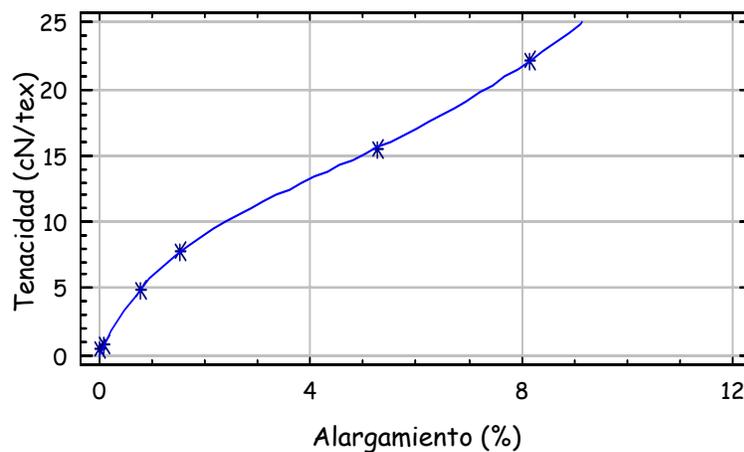
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 14)

Figura 112

Tabla 122 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 15)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	3.3065	3.2643	-10.7388	17.3519
b	-7.1994	38.2847	-171.925	157.526
c	7.4663	8.3202	-28.3327	43.2655
u	0.4109	0.4224	-1.4066	2.2284
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		817.412	4	204.353
Residual		0.1805	2	0.0902
Total		817.592	6	
R ² ajustada		99.879%		
Error estándar		0.3004		
Error medio absoluto		0.0849		

Tenacidad Vs. Alargamiento



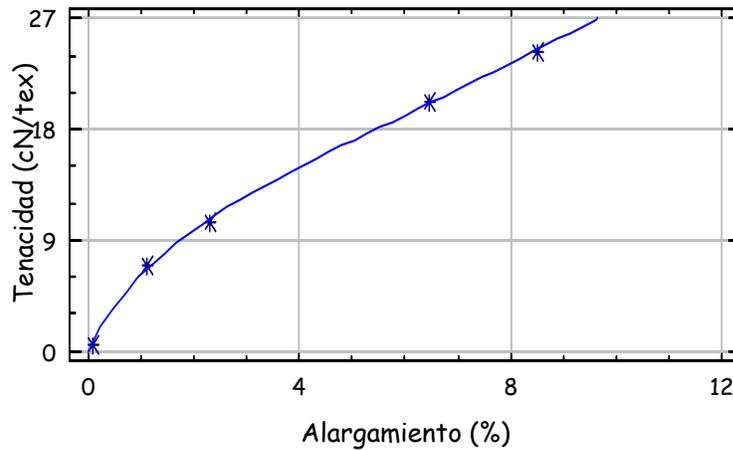
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 15)

Figura 113

Tabla 123 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 16)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	2.1692	0.4328	-3.3309	7.6694
b	6.0863	3.3386	-36.3353	48.508
c	-0.0160	6936.93	-88142.0	88142.0
u	1.1317	1139.45	-14476.9	14479.2
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1163.16	4	290.79
Residual		0.3401	1	0.3401
Total		1163.5	5	
R ² ajustada		99.6424%		
Error estándar		0.5832		
Error medio absoluto		0.2517		

Tenacidad Vs. Alargamiento



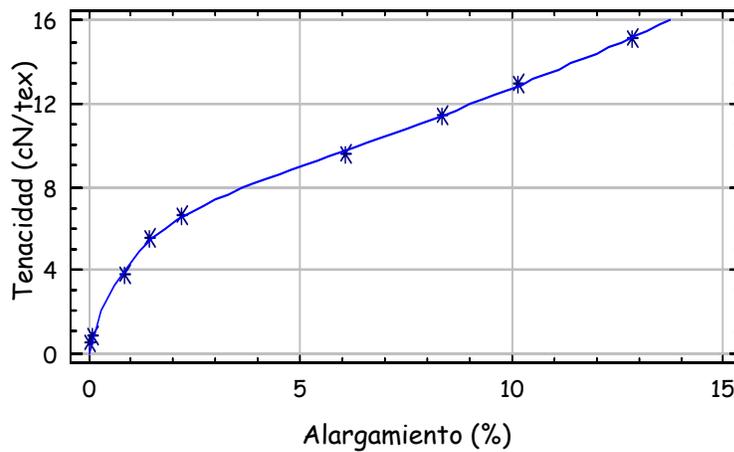
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 16)

Figura 114

Tabla 124 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 17)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	0.8346	0.0680	0.6598	1.0094
b	4.4473	0.7337	2.5612	6.3334
c	2.6866	0.9804	0.1663	5.2068
u	0.7474	0.2573	0.0860	1.4089
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		710.297	4	177.574
Residual		0.2528	5	0.0505
Total		710.55	9	
R ² ajustada		99.8154%		
Error estándar		0.2248		
Error medio absoluto		0.1104		

Tenacidad Vs. Alargamiento



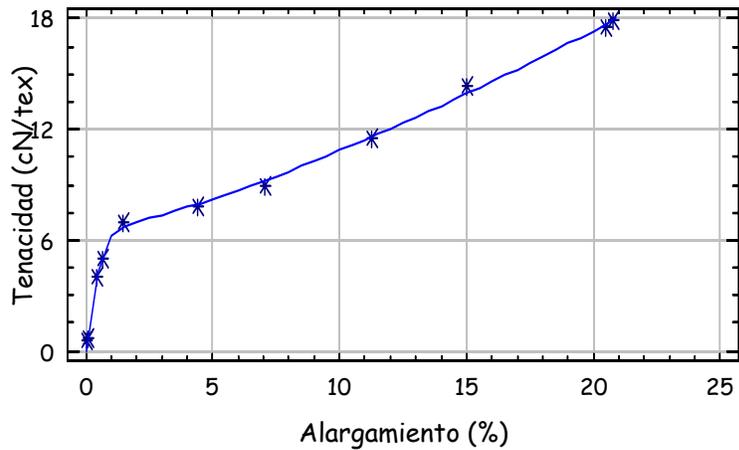
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 17)

Figura 115

Tabla 125 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 18)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	0.6551	0.0243	0.5974	0.7127
b	4.2611	0.3955	3.3258	5.1963
c	7.1914	0.5612	5.8643	8.5185
u	0.8528	0.1133	0.5948	1.1208
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		1196.65	4	299.163
Residual		0.5003	7	0.0714
Total		1197.15	11	
R ² ajustada		99.8092%		
Error estándar		0.2673		
Error medio absoluto		0.1589		

Tenacidad Vs. Alargamiento



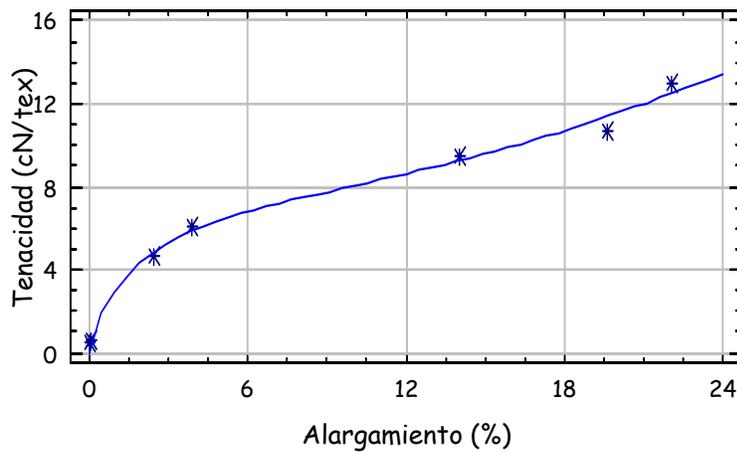
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 18)

Figura 116

Tabla 126 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 19)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	0.7142	1.2921	-3.3979	4.8265
b	-4.7185	37.5969	-124.369	114.932
c	2.8240	3.3031	-7.6879	13.336
u	0.1725	0.2394	-0.5893	0.9344
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		429.478	4	107.37
Residual		0.9360	3	0.3120
Total		430.414	7	
R ² ajustada		98.6819%		
Error estándar		0.5585		
Error medio absoluto		0.3028		

Tenacidad Vs. Alargamiento



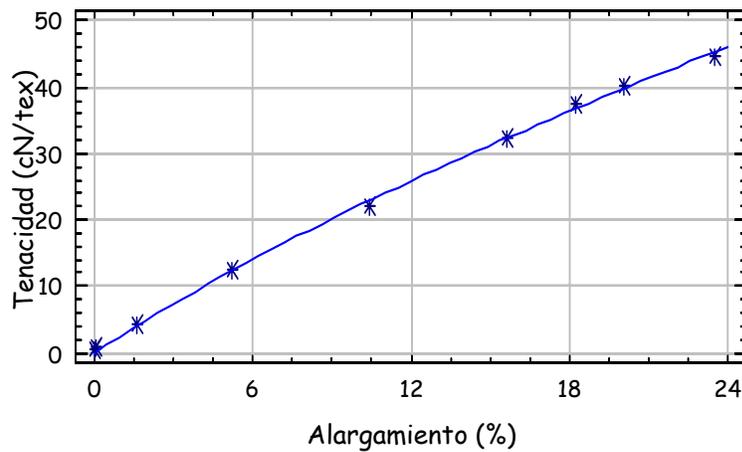
Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 19)

Figura 117

Tabla 127 Regresión lineal del modelo de Zurek (Hilo 20)

Parámetros	Estimado	Error estándar asintótico	Coeficiente de intervalo asintótico	
			Inferior	Superior
a	1.5174	48.2603	-122.541	125.541
b	-0.5283	4317.22	-11098.3	11097.3
c	1.0246	116.549	-298.575	300.625
u	0.0374	1.4024	-3.5678	3.6426
Análisis de varianza		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio
Modelo		6724.79	4	1681.2
Residual		2.0949	5	0.4189
Total		6726.89	9	
R ² ajustada		99.8668%		
Error estándar		0.6472		
Error medio absoluto		0.4277		

Tenacidad Vs. Alargamiento



Tenacidad vs. Alargamiento aplicando el modelo de Zurek (Hilo 20)

Figura 118

Tabla 128 Coeficiente de correlación

	Fuerza	Tenacidad	Alargamiento	Modulo	Trabajo de rotura
Maxwell					
A	0,0565	0,2129	-0,0904	0,4645	-0,0419
B	0,0342	-0,0962	0,1111	0,3919	0,0806
Maxwell modificado					
A	0,2054	0,2201	0,4693	0,4137	0,3117
B	0,0132	-0,0626	0,2739	-0,1905	0,2206
C	-0,2310	-0,1187	-0,2495	-0,5407	-0,1446
Vangheluwe					
A	0,3038	0,6771	0,4132	-0,0261	0,3775
B	0,07620	-0,0293	0,1775	0,5629	-0,0173
C	-0,2000	-0,1036	-0,7289	0,2244	-0,5072
Vangheluwe modificado (4 parámetros)					
A	0,1106	0,0467	-0,0261	0,1419	-0,3277
B	0,0992	0,1936	0,0035	0,5747	0,2813
C	-0,0017	0,0852	0,0926	0,0149	-0,1708
D	-0,0256	0,1196	-0,1228	0,0764	-0,2029
Vangheluwe modificado (5 parámetros)					
A	0,4535	0,7659	0,5725	0,1807	0,5274
B	0,1278	0,0079	0,1381	0,4369	0,0231
C	-0,4956	-0,4494	-0,7214	-0,4469	-0,5201
D	0,3723	0,3853	0,2213	0,5446	0,1438
E	0,1591	0,1977	0,1066	0,3285	0,0746
Zurek					
A	-0,0324	0,2727	-0,5542	0,3840	-0,4072
B	0,2081	-0,0153	0,4640	-0,2326	0,5134
C	0,1621	0,2819	0,0821	0,6515	-0,0360
U	-0,1046	0,0447	-0,0602	0,3201	-0,1463

9. CONCLUSIONES

Del presente trabajo se deducen las siguientes conclusiones:

1. El modelo de Maxwell y el modificado del mismo nombre, ajusta excelentemente a las curvas carga-alargamiento de los hilos fabricados con fibras naturales, ello se debe a que ambos modelos mecánicos contemplan un émbolo lineal o no lineal según sea su caso, lo que explica el módulo elástico de estas fibras; casos concretos como el algodón no modifica su módulo hasta antes de un 98% de la carga de rotura.
2. En cuanto al modelo de Vangheluwe, debido a su construcción (un émbolo no lineal colocado en paralelo con un elemento de Newton) favorece el ajuste a curvas carga-alargamiento de hilos sintéticos, que presentan dos zonas de refuerzo. El modelo anterior matemáticamente presenta dos partes, la primera de ellas corresponde a un modelo exponencial y, el segundo es un término cuadrático correctivo.
3. Se utilizó dos modelos modificados del propuesto por Vangheluwe, en el primero de ellos se sustituyeron las deformaciones lineales de éste modelo por funciones potenciales de la deformación (coeficiente D) y obtener la modificación de este; la segunda modificación consistió en introducir dos funciones potenciales a la deformación (coeficiente D y E), cabe indicar que los coeficientes obtenidos al ajustar el modelo modificado de cinco términos a las curvas carga alargamiento de los hilos en estudio se observó que el valor numérico de estos es muy cercano, por lo que resulta conveniente trabajar con el modificado de cuatro términos (coeficientes A, B, C y D). Puede decirse que los ajustes en las curvas

dinamométricas de los hilos elaborados con fibras sintéticas en todos los casos es significativa al 1% de confianza estadística.

4. El ajuste realizado a las curvas dinamométricas de los hilos en estudio utilizando el modelo de Zurek, resultó adecuado encontrándose excelentes niveles de aproximación, significativos al 1% de confianza estadística.
5. Al efectuarse el análisis de correlación se determinó que los parámetros del modelo de Vangheluwe tienen una elevada correlación lineal con la fluencia y rigidez de los hilos en estudio.
6. Cabe señalar que los parámetros de los modelos utilizados para cada caso tienen un significado específico, es decir el parámetro "A" del modelo de Vangheluwe corresponde a la fluencia en la curva carga alargamiento, mientras que este mismo parámetro pero para el modelo de Zurek corresponde a la rigidez del hilo en estudio.
7. En este estudio, los ajustes de los modelos mecánicos se presentaron en tres grupos, correspondiendo cada grupo a la naturaleza de los materiales (naturales, químicos y sintéticos).
8. Se incluyeron hilos fabricados con diversos procesos de hilatura, entre ellos se estudiaron hilos elásticos (algodón-elastano) fabricados con el sistema de hilatura Core Spun. En este tipo de hilos se presenta una fluencia notablemente superior al mostrado por los hilos convencionales (hilatura de anillos y open end).
9. Las propiedades mecánicas de los hilos fueron el alargamiento y fuerza de rotura, tenacidad, módulo de young, trabajo a la rotura.

10. RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS

En posteriores trabajos se debe contemplar ajustar el modelo de Vangheluwe a las curvas carga alargamiento de hilos textiles, utilizando métodos como el denominado hiperplano o por la técnica de mínimos cuadrados, como a continuación se señala.

9.1 MÉTODO DEL HIPERPLANO

Otro método para evaluar los valores numéricos iniciales de los parámetros del modelo de Vangheluwe es a través de una modificación del algoritmo de Guggenheim, el cual indica que tomando valores sobre el modelo igualmente espaciados en las abscisas se pueden establecer dos subconjuntos de $n/2$ puntos cada uno (x, γ) y (x', γ') . Donde los (x, γ) son los primeros $n/2$ puntos de la curva y (x', γ') son los siguientes $n/2$ puntos de la misma y cumplen respectivamente las expresiones (i) y (ii).

$$\gamma \rightarrow \sigma \quad (i)$$

$$\gamma' \rightarrow \sigma' \quad (ii)$$

A partir de éstos subconjuntos de puntos se construye un arreglo rectangular, en donde la diferencia entre cada una de las abscisas y sus correspondientes abscisas primas es una constante por haber tomado a los puntos igualmente espaciados. Dicha constante se denomina de desplazamiento de Guggenheim (τ).

$$\gamma' - \gamma = \tau \quad (iii)$$

Por ello, la expresión (iii) se escribe como indica en (iv)

$$\gamma + \tau \rightarrow \sigma' \quad (iv)$$

Aplicando las expresiones (ii) y (iv) al modelo de Vangheluwe nos conduce a:

$$\sigma - C\gamma^2 - A = -Ae^{-B\gamma} \quad (v)$$

$$\sigma' - C(\gamma + \tau)^2 - A = -Ae^{-B(\gamma + \tau)} \quad (vi)$$

Restando miembro a miembro (v) a (vi) tenemos:

$$\sigma' = \sigma e^{-B\tau} + \gamma^2 C(1 - e^{-B\tau}) + \gamma 2C\tau + [A(1 - e^{-B\tau}) + C\tau^2] \quad (vii)$$

Aunque sería posible tratar a la ecuación (vii) como una función lineal en tres dimensiones, resulta cómodo hacerlo con un hiperplano de cuatro dimensiones, considerando a γ^2 como una variable independiente. Aplicando métodos de regresión lineal múltiple se obtienen valores numéricos para:

$$|\beta_1| = e^{-B\tau} \quad (viii)$$

$$|\beta_2| = C(1 - e^{-B\tau}) \quad (ix)$$

$$|\beta_3| = 2C\tau \quad (x)$$

$$|\beta_0| = A(1 - e^{-B\tau}) + C\tau^2 \quad (xi)$$

De donde se puede determinar de manera inmediata a los parámetros **A**, **B** y **C**. Resulta conveniente por simplicidad emplear la expresión (x) para evaluar el parámetro **C** en lugar

de la ecuación (ix). Procediendo a aplicar el método anterior, se construye el arreglo de Guggenheim, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 129 Arreglo rectangular de Guggenheim

γ (%)	γ' (%)	σ (cN/tex)	σ' (cN/tex)	Constante de Guggenheim (τ)
0	5	0.556	10.800	5
1	6	3.336	12.912	5
2	7	5.400	15.000	5
3	8	7.224	17.400	5
4	9	9.000	19.704	5

Nota: Esta tabla se realizó utilizando el hilo ejemplo que tratamos en éste trabajo de tesis

Aplicando regresión lineal múltiple de acuerdo a la expresión (vii) hallamos los valores numéricos siguientes:

$$|\beta_1| = 0.03912 \quad (xii)$$

$$|\beta_2| = 0.04343 \quad (xiii)$$

$$|\beta_3| = 2.1371 \quad (xiv)$$

$$|\beta_0| = 10.828 \quad (xv)$$

Sustituyendo los valores anteriores en (viii), (x) y (xi) obtenemos los valores numéricos correspondientes al modelo de Vangheluwe por el método del hiperplano:

$$\sigma = 5.7083(1 - e^{-0.648582\gamma}) + 0.213697\gamma^2 \quad (xvi)$$

9.2 TÉCNICA DE MÍNIMOS CUADRADOS

Finalmente, en este apartado se aplica la técnica de mínimos cuadrados al ya citado modelo de Vangheluwe para ajustar los datos extraídos de la curva tenacidad-alargamiento del hilo de poliéster-algodón.

$$S = \sum_{i=1}^n \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right]^2$$

Resolviendo las ecuaciones normales $\frac{\partial S}{\partial A} = \frac{\partial S}{\partial B} = \frac{\partial S}{\partial C} = 0$, tenemos:

$$\frac{\partial S}{\partial A} = \sum_{i=1}^n 2 \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] \frac{\partial}{\partial A} \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial A} = 2 \sum_{i=1}^n \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] (1 - e^{-B\gamma}) = 0$$

Cancelando al 2 del lado derecho nos queda:

$$\frac{\partial S}{\partial A} = \sum_{i=1}^n \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] (1 - e^{-B\gamma}) = 0 \quad (xvii)$$

Ahora,

$$\frac{\partial S}{\partial B} = \sum_{i=1}^n 2 \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] \frac{\partial}{\partial B} \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial B} = 2 \sum_{i=1}^n \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] (A\gamma e^{-B\gamma}) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial B} = 2A \sum_{i=1}^n \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] (\gamma e^{-B\gamma}) = 0$$

Cancelando al 2A del lado derecho nos queda:

$$\frac{\partial S}{\partial B} = \sum_{i=1}^n \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] (\gamma e^{-B\gamma}) = 0 \quad (xviii)$$

Finalmente para la tercera variable:

$$\frac{\partial S}{\partial C} = \sum_{i=1}^n 2 \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] \frac{\partial}{\partial C} \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial C} = 2 \sum_{i=1}^n \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] (\gamma^2) = 0$$

Cancelando al 2 del lado derecho nos queda:

$$\frac{\partial S}{\partial C} = \sum_{i=1}^n \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] (\gamma^2) = 0 \quad (xix)$$

De acuerdo a (xvii), (xviii) y (xix), este es un sistema de tres ecuaciones no lineales con tres incógnitas (xx):

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial A} &= \sum_{i=1}^n \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] (1 - e^{-B\gamma}) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial B} &= \sum_{i=1}^n \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] (\gamma e^{-B\gamma}) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial C} &= \sum_{i=1}^n \left[(A(1 - e^{-B\gamma}) + C\gamma^2 - \sigma) \right] (\gamma^2) = 0 \end{aligned} \quad (xx)$$

Es imposible simplificar más a este sistema no lineal (xx); Sin embargo es posible resolverlo por un método iterativo, que en el caso de este trabajo es el método de Newton-Raphson.

Para resolver el sistema de tres ecuaciones no lineales con tres incógnitas f_1, f_2 y f_3 (xx) utilizamos el método de Newton-Raphson que consiste en: Plantear el sistema de tres ecuaciones no lineales con tres incógnitas f_1, f_2 y f_3 . (xx) y calcular el Jacobiano (matriz formada por las derivadas parciales de las funciones del sistema que se aplica con la finalidad de linealizar a este).

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial A} & \frac{\partial f_1}{\partial B} & \frac{\partial f_1}{\partial C} \\ \frac{\partial f_2}{\partial A} & \frac{\partial f_2}{\partial B} & \frac{\partial f_2}{\partial C} \\ \frac{\partial f_3}{\partial A} & \frac{\partial f_3}{\partial B} & \frac{\partial f_3}{\partial C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -f_1 \\ -f_2 \\ -f_3 \end{bmatrix}$$

Se calculó sustituyendo los valores de A, B y C con un vector solución $[A_0, B_0, C_0]$, que inicialmente valdrá $[0,0,0]$ esto por la necesidad de contar con un estimador inicial. Se obtiene un sistema de tres ecuaciones lineales con tres incógnitas que se resolvió por

Gauss-Jordán, entonces tenemos un vector solución $[h, k, l]$ que sumado al vector solución $[A_0, B_0, C_0]$ conduce a los valores para $[A_1 = A_0 + h, B_1 = B_0 + k, C_1 = C_0 + l]$. Se procedió a calcular la siguiente iteración con los nuevos valores de $[A_1, B_1, C_1]$ hasta que el vector solución fue convergente al sistema de ecuaciones no lineales (xx), el proceso iterativo se detuvo al llegar a la distancia mínima (criterio de paro para el proceso iterativo) que se planteó al inicio del proceso. En ocasiones los sistemas no lineales son inconsistentes y si se toma el vector $[0, 0, 0]$ como vector inicial para el proceso iterativo puede que no converja a la solución, solo entonces, se auxilia con una línea de tendencia exponencial y los valores obtenidos son estimadores iniciales para el proceso iterativo.

En la siguiente **tabla 130** se presentan los resultados obtenidos para los parámetros del modelo de Vangheluwe a la novena iteración.

Tabla 130 Las iteraciones obtenidas por el método de Newton-Raphson.

No.	A	B	C	Distancia
0	1.84	0.307	0.3	0
1	10.2305669	0.33576697	0.12263817	8.39249055
2	9.90452331	0.31824026	0.12702151	0.32654375
3	4.3626577	0.59522461	0.17955768	5.54903188
4	7.13216553	0.58824674	0.15940837	2.76958992
5	7.69824205	0.47943563	0.15132252	0.57649619
6	7.84767909	0.47905085	0.14972023	0.14944613
7	7.85114911	0.47862922	0.14967586	0.00349582
8	7.85115439	0.47862899	0.1496758	5.2874E-06
9	7.85115439	0.47862899	0.1496758	0
10	7.85115439	0.47862899	0.1496758	0

De ahí, que el modelo ajustado sea el siguiente:

$$\sigma = 7.85115439(1 - e^{-0.47862899\gamma}) + 0.1496758\gamma^2 \quad (xi)$$

Los valores numéricos del modelo de Vangheluwe calculados por el método gráfico, método iterativo Marquardt, método del hiperplano y técnica de mínimos cuadrados, ecuaciones (i), (xvi) y (xxi) respectivamente, se muestran en la **tabla 131**.

Tabla 131 Valores numéricos del modelo de Vangheluwe obtenidos por técnicas distintas.

Parámetros del modelo de Vangheluwe			
Técnica utilizada:	A	B	C
Método gráfico	4.0000	0.761904	0.207612
Método iterativo Marquardt	7.84479	0.479028	0.149716
Hiperplano	5.70830	0.648582	0.213690
Mínimos cuadrados	7.85110	0.478629	0.149670

A partir de las constantes numéricas contenidas en la tabla anterior, se procedió a calcular la suma de cuadrados de los residuos de acuerdo a (xxii) llegando a los resultados de la **tabla 132**.

$$SC = \sum (\sigma_{\text{experimental}} - \sigma_{\text{calculada}})^2 \quad (xxii)$$

Tabla 132 Suma de cuadrados de los residuos de los métodos de evaluación.

No.	Método iterativo Marquardt	Método del hiperplano	Técnica de mínimos cuadrados	Suma de cuadrados (Marquardt)	Suma de cuadrados (hiperplano)	Suma de cuadrados (Mínimos cuadrados)
1	0.00000	0.0000	0.0000	0.3091	0.3090	0.3090
2	3.13556	2.9380	3.1360	0.0402	0.1590	0.0400
3	5.43409	5.0030	5.4350	0.0012	0.1580	0.0010
4	7.32816	6.8160	7.3300	0.0108	0.1660	0.0110
5	9.08567	8.7010	9.0870	0.0073	0.0890	0.0080
6	10.8726	10.828	10.874	0.0053	0.0010	0.0050
7	12.7916	13.285	12.792	0.0145	0.1390	0.0140
8	14.9065	16.119	14.906	0.0087	1.2510	0.0090
9	17.2567	19.353	17.255	0.0205	3.8140	0.0210
10	19.8665	23.001	19.863	0.0264	10.871	0.0250
			Σ	0.4441	16.957	0.4440

Concluimos que la técnica de mínimos cuadrados tiene una suma de cuadrados de 0.4440, que es sensiblemente menor que los obtenidos el método del hiperplano, sin embargo es importante destacar que el método del hiperplano resulta una valiosa herramienta ya que no requiere de software especiales, sólo de una hoja de cálculo como excel.

Para el caso del modelo de Zurek, también puede utilizarse la técnica de mínimos cuadrados, así como un modificado de éste; Sustituyendo las funcione lineales de la deformación por funciones potenciales de la deformación.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Aklonis, John J.; J. William; J. Macknight, and Mitchel Shen. Introduction to Polymer Viscoelasticity.
- Barberán Falcón, José Manuel. Unicidad por Métodos Energéticos en la Elasticidad y Viscoelasticidad; 1966
- Beltrán Fernández, Alfonso. Análisis de Mecánicas de la Factura en Materiales Poliméricos, 2002.
- Booth, J.E, B. Sc (Tech), F.T.I. Principles of Textile Testing. An Introduction Physical Methods of Testing Textile Fibres, Yans, and Fabrics; Chemical Publisching Co. Inc, New York, N.Y, 1964.
- Daily, James W. Fluid Dinamics. Reading. Pub. Addison-Wesley, 1996.
- Diccionario de Física. Ed. Complutense, 1998.
- Diccionario de Matemáticas. Ed. Complutense, 1998.
- Doblaré Castellano, Manuel. Fundamentos de Elasticidad Lineal; BNCT, 1998.
- Flügge, Wilhelm. Viscoelasticity; 1967.
- Kerguignas, Marcel. Resistencia de Materiales.
- Riando, Evaristo; Diaz Calleja. Polymer Viscoelasticity Stress and Strain in Practice; Ed. Marcel, Dekker, Inc. New York, Basel, 2000.
- Salazar Resines, Enrique Javier. Notas Sobre Métodos de Elasticidad.
- Schutz, R. A, Dr. del Centro de Investigaciones Textiles de Mulhouse. Curso de Reología Textil

- Vennard, John K; Street, Robert L. Elementos de Mecánica de Fluidos; Versión SI. 1ª Ed. 1989; Cia. Editorial continental, S.A de C.V, México.
- Wulff, John. Traducción Grinberg Finkelstein, Adolfo. Introducción a la Ciencia de Materiales; 1991.