

CORRELACIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS PARA EVALUAR LA RESISTENCIA MECÁNICA DE JUNTAS ADHESIVAS ANAERÓBICAS SOMETIDAS A ENSAYOS DE TORSIÓN PURA

Luis Fernando Gil Bedoya^{1}, G. L. García², Albeiro Espinosa³*

1: Investigador línea de Diseño Mecánico Computacional, Maestría en Ingeniería Mecánica.

Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

2: Docente Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

3: Docente Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

*Contacto: lfgil@unal.edu.co

RESUMEN

En este trabajo, se presenta una correlación multivariada entre los principales parámetros geométricos que afectan la resistencia mecánica de una unión adhesiva, que a diferencia de los estudios tradicionales sólo consideran la influencia de cada factor de forma independiente. Se seleccionó el espesor del adhesivo, la longitud de traslape de la unión y la rugosidad superficial de los elementos en contacto como parámetros representativos que influyen en la resistencia mecánica de una unión adhesiva con geometría cilíndrica. La unión de estos dos elementos realizada con un adhesivo anaeróbico fue sometida a un ensayo de torsión pura controlado para determinar la carga máxima de ruptura. Se utilizó la metodología del diseño de experimentos para evaluar una región factorial 2k, replicado tres veces. El análisis de varianza en conjunto con el de Pareto permitió identificar la significancia estadística de cada uno de los parámetros geométricos. Finalmente, se empleó un modelo de regresión y de superficie de respuesta para explicar el comportamiento mecánico de la unión considerando el tratamiento estadístico más significativo.

Palabras Clave: *Parámetros geométricos, Espesor de unión, longitud de solape, rugosidad superficial, diseño experimental.*

ABSTRACT

In this paper, we present a multivariate correlation between the main geometrical parameters affecting the mechanical strength of an adhesive joint, unlike traditional studies only consider the influence of each factor independently. Was selected the adhesive thickness, the length of overlap of the joint and the surface roughness of the contact elements as representative parameters, which influence the mechanical strength of an adhesive joint with a cylindrical geometry. The joint of these two elements made of an anaerobic adhesive was subjected to controlled torsion test to determine the maximum ultimate load. We used the experimental design methodology to assess a region 2k factorial, replicated three times. The analysis of variance in conjunction with Pareto's has allowed identify the statistical significance of each of the geometric parameters. Finally, a regression model and response surface were used to explain the mechanical behavior of the joint considering the most significant statistical treatment.

Keywords: *Geometric parameters, joint thickness, overlap length, surface roughness, experimental design.*

1 INTRODUCCIÓN

Trabajos de investigación realizados por diferentes autores [1,8] relacionados con los parámetros geométricos de la unión adhesiva (espesor, longitud de traslape, rugosidad superficial), explican la influencia de dichos parámetros. Sin embargo en la mayoría de las aplicaciones de ingeniería en el diseño de la junta no son tenidos en cuenta dichos factores [1][7]. Algunos estudios son realizados con un sólo parámetro geométrico [3][6][10] y por lo tanto, los resultados se limitan a la influencia particular de dicho factor. En este trabajo se evalúa una región experimental para correlacionar estos parámetros geométricos con la resistencia mecánica de una junta adhesiva anaeróbica de tipo eje-anillo ilustrada en la figura 1, sometida a torsión pura, y se obtiene un punto de referencia que será utilizado en la optimización de su proceso de diseño y selección de los parámetros geométricos.

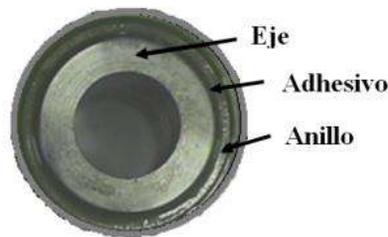


Figura 1. Ensamble y fijación del ensamble eje-anillo con adhesivo anaeróbico comercial 648.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

El esquema fotográfico de la figura 2 ilustra los materiales y métodos empleados, según los siguientes pasos:

2.1 Preparación de las juntas

Utilizando un diseño de junta que consiste en un sustrato de acero AISI- SAE 4140 tipo eje y un sustrato de acero AISI-SAE 52100 tipo anillo de rodamiento, los cuales se unieron mediante un adhesivo anaeróbico referencia comercial Loctite 648.

2.2 Realización de la unión anaeróbica

Se diseñó una matriz rectangular de 24 probetas con orificios cilíndricos para garantizar la concetricidad del eje con el anillo de rodamiento y se garantizó la misma cantidad de adhesivo aplicado a cada junta. Posteriormente, las probetas fueron curadas en un horno a 80°C, durante 1 hora, según las recomendaciones del fabricante de los adhesivos.

2.3 Medición de la rugosidad

Fue medida utilizando un rugosímetro digital de marca Mitutoyo, instalado en el laboratorio de Tribología de la Universidad Nacional de Colombia. Los niveles de rugosidad superficial (Ra) se

obtuvieron variando los parámetros de corte (velocidad de avance y de rotación) para el maquinado del eje, utilizando un torno CNC, mientras que la rugosidad superficial del anillo comercial no sufrió ninguna modificación.



Maquinado → Rugosidad → Ensamble → Curado → Montaje de prueba

Figura 2. Esquema del proceso de realización y ensayo a torsión de la junta adhesiva.

2.4 Pruebas de torsión

Se utilizó un equipo instalado en el laboratorio de uniones adhesivas de la Universidad Nacional de Colombia, que consiste en un montaje diseñado con servomotor-reductor marca SEW Eurodrive que permite controlar el torque aplicado. El código de programación se realizó en lenguaje C++ utilizando el Software Movitools Motions Studio, propio del servo. Una vez, se realizó el montaje de la junta, se sometió al ensayo de torsión pura y se tomaron los resultados de la resistencia a la falla para ser utilizados en el diseño de experimentos.

2.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó con el software MINITAB 16 para un diseño multivariado de tres factores y con dos niveles (alto y bajo) en unidades codificadas (1, -1). Estos valores son extraídos de la literatura [1][6,8][10], en unidades no codificadas (ver figura 3). Se definió una región experimental en forma de cubo.

Factors:	3	Base Desing:	3.8
Runs:	24	Replicates:	3
Blocks:	none	Center pts (total):	0
Display Order: Run Order			
Display Units: Uncoded			
Factors and Their Uncoded Levels			
Factor	Name	Low	High
A	Espesor	0,1	0,3
B	Rugosidad	0,7	1,5
C	Longitud	12	16
Responses and Models			
Response:	Resistencia		
Terms:	A B C AB AC BC ABC		

Figura 3. Diseño factorial completo con interacciones

La tabla 1 muestra que los 24 tratamientos presentaron alta dispersión para los valores obtenidos de resistencia. La técnica de análisis de varianza y el diagrama de Pareto se aplicó para encontrar la significancia de los factores y sus interacciones. Se empleó el modelo de regresión lineal y de superficie de respuesta para describir el comportamiento mecánico de la unión [9].

Tabla 1. Matriz de diseño con 24 corridas

Std Order	Run Order	CenterPt	Blocks	Espesor (mm)	Rugosidad (μm)	Longitud (mm)	Resistencia (Nm)
18	1	1	1	0,3	0,7	12	118,137
20	2	1	1	0,3	1,5	12	144,389
16	3	1	1	0,3	1,5	16	252,025
3	4	1	1	0,1	1,5	12	139,139
1	5	1	1	0,1	0,7	12	57,756
22	6	1	1	0,3	0,7	16	162,766
15	7	1	1	0,1	1,5	16	91,884
17	8	1	1	0,1	0,7	12	99,760
11	9	1	1	0,1	1,5	12	65,632
4	10	1	1	0,3	1,5	12	118,137
9	11	1	1	0,1	0,7	12	73,507
10	12	1	1	0,3	0,7	12	149,640
8	13	1	1	0,3	1,5	16	259,901
6	14	1	1	0,3	0,7	16	198,059
23	15	1	1	0,1	1,5	16	168,017
14	16	1	1	0,3	0,7	16	140,056
13	17	1	1	0,1	0,7	16	78,758
21	18	1	1	0,1	0,7	16	65,632
7	19	1	1	0,1	1,5	16	131,263
2	20	1	1	0,3	0,7	12	105,010
19	21	1	1	0,1	1,5	12	105,070
12	22	1	1	0,3	1,5	12	105,089
5	23	1	1	0,1	0,7	16	104,998
24	24	1	1	0,3	1,5	16	210,021

3 RESULTADOS

3.1 Pruebas de torsión

La figura 4 presenta la significancia estadística, representada por el valor ($p\text{-value} < 0.05$ o 5%), para los tres parámetros geométricos tomados individualmente. De manera similar ocurre para los efectos combinados de las interacciones dobles de los factores (espesor-longitud), (rugosidad-longitud).

Con estos últimos, se elaboró una segunda ANOVA (figura 5), con la finalidad de llevar la interacción doble (espesor-rugosidad) y la triple (espesor-rugosidad-longitud) al error residual dada, su mínima significancia. Esta situación, mejoró, significativamente, el estadístico de prueba ($p\text{-value}$) para cada factor individual y para sus interacciones, además de los coeficientes de determinación R^2 y R_{aj}^2 . La significancia se ratificó con la gráfica de Pareto y Daniels, ver figura 6.

Factorial Fit: Resistencia versus Espesor. Rugosidad.Longitud

Estimated Effects and Coefficients for Resistencia (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		131,022	5,663	24,14	0,000
Espesor	65,149	32,574	5,663	5,75	0,000
Rugosidad	36,361	18,181	5,663	3,21	0,005
Longitud	48,522	24,261	5,663	4,28	0,001
Espesor*Rugosidad	-0,392	-0,196	5,663	-0,03	0,973
Espesor*Longitud	31,895	15,948	5,663	2,82	0,012
Rugosidad*Longitud	24,110	12,055	5,663	2,13	0,049
Espesor*Rugosidad*Longitud	13,609	6,805	5,663	1,20	0,247

S = 27,7410 PRESS = 27704,4
R-Sq = 82,55% R-Sq (pred) = 60,73% R-Sq (adj) = 74,91%

Analysis of Variance for Resistencia (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	47525,3	47525,3	15841,8	20,59	0,000
Espesor	1	25466,1	25466,1	25466,1	33,09	0,000
Rugosidad	1	7932,9	7932,9	7932,9	10,31	0,005
Longitud	1	14126,3	14126,3	14126,3	18,36	0,001
2-Way Interactions	3	9592,6	9592,6	3197,5	4,15	0,023
Espesor*Rugosidad	1	0,9	0,9	0,9	0,00	0,973
Espesor*Longitud	1	6103,9	6103,9	6103,9	7,93	0,012
Rugosidad*Longitud	1	3487,8	3487,8	3487,8	4,53	0,049
3-Way Interactions	1	1111,3	1111,3	1111,3	1,44	0,247
Espesor*Rugosidad*Longitud	1	1111,3	1111,3	1111,3	1,44	0,247
Residual Error	16	12313,0	12313,0	769,6		
Pure Error	16	12313,0	12313,0	769,6		
Total	23	70542,3				

Figura 4. Análisis de varianza para la resistencia

Factorial Fit: Resistencia versus Espesor. Rugosidad.Longitud

Estimated Effects and Coefficients for Resistencia (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		131,02	5,575	23,50	0,000
Espesor	65,15	32,57	5,575	5,84	0,000
Rugosidad	36,36	18,18	5,575	3,26	0,004
Longitud	48,52	24,26	5,575	4,35	0,000
Espesor*Longitud	31,90	15,95	5,575	2,86	0,010
Rugosidad*Longitud	24,11	12,06	5,575	2,16	0,044

S = 27,3102 PRESS = 23867,1
R-Sq = 80,97% R-Sq (pred) = 66,17% R-Sq (adj) = 75,68%

Analysis of Variance for Resistencia (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	47525	47525	15841,8	21,24	0,000
Espesor	1	25466	25466	25466,1	34,14	0,000
Rugosidad	1	7933	7933	7932,9	10,64	0,004
Longitud	1	14126	14126	14126,3	18,94	0,000
2-Way Interactions	2	9592	9592	4795,9	6,43	0,008
Espesor*Longitud	1	6104	6104	6103,9	8,18	0,010
Rugosidad*Longitud	1	3488	3488	3487,8	4,68	0,049
Residual Error	18	13425	13425	745,8		
Lack of Fit	2	1112	1112	556,1	0,72	0,501
Pure Error	16	12313	12313	769,6		
Total	23	70542				

Figura 5. Mejor ANOVA

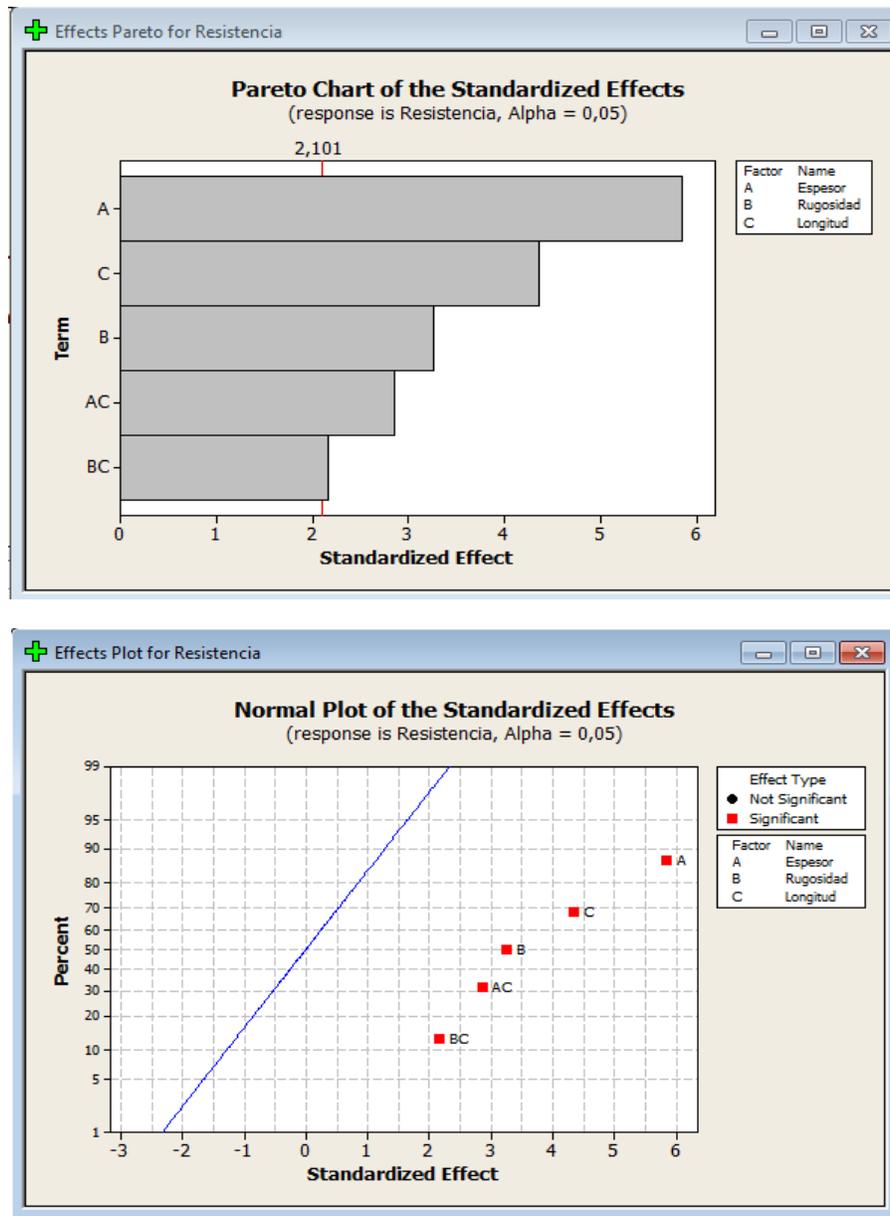


Figura 6. Gráfica de factores e interacciones significativos de Pareto y Daniels

A partir de la gráfica 7 de efectos principales y de interacciones, se puede recomendar el mejor diseño geométrico de área y superficie de contacto para la junta adhesiva, dado su comportamiento, en términos de la resistencia de falla. Por consiguiente, se fijan los factores en los niveles: alto para el espesor (0,3mm), alto para la rugosidad (1,5 μ m) y alto para la longitud (16mm). Además, se puede apreciar la respuesta predicha en los vértices de la región experimental según la gráfica del cubo. Ver figura 7.

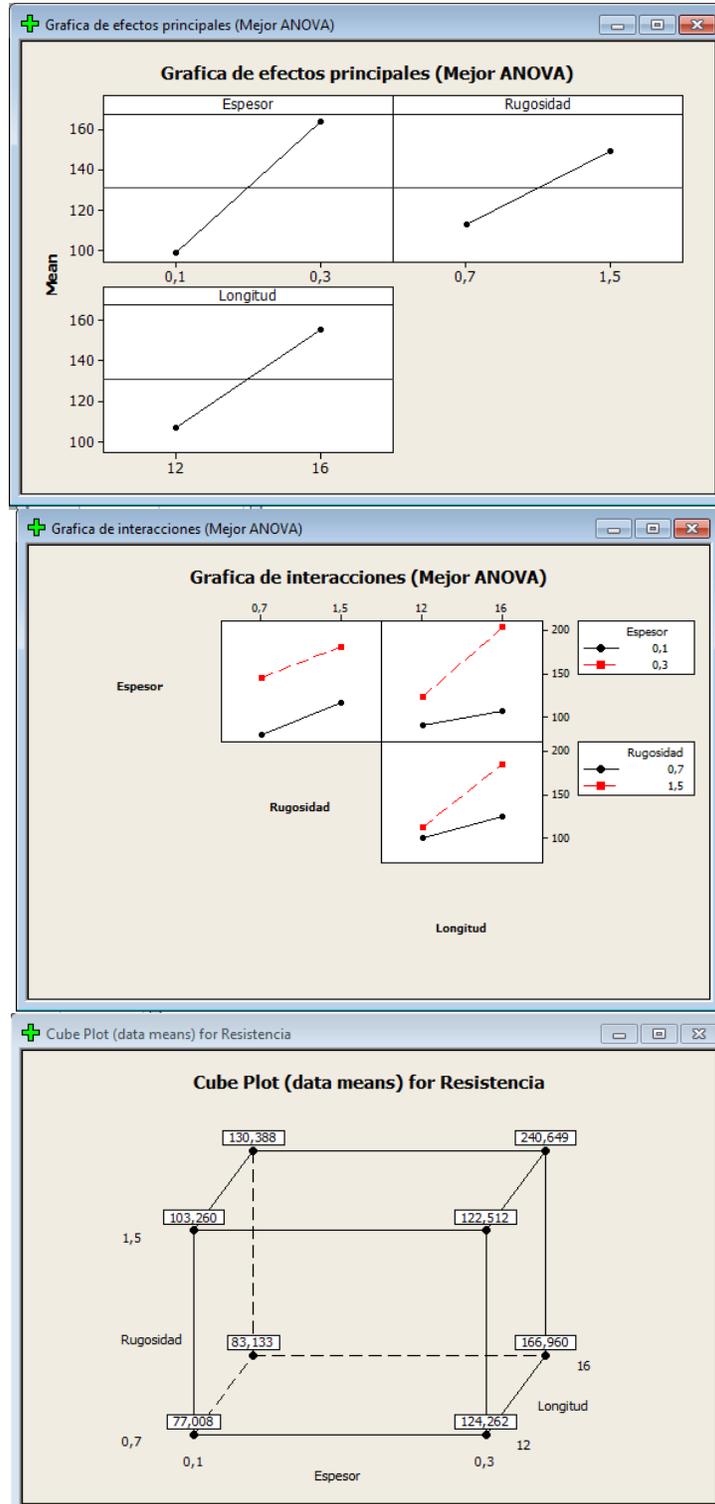


Figura 7. Gráfica de efectos principales, interacciones y del cubo para la respuesta predicha.

Para cada punto del diseño experimental, utilizando para cada factor la nomenclatura mostrada en la figura 3 y considerando los coeficientes de mejor ANOVA, se utiliza un modelo de regresión lineal que en unidades codificadas [9] está dada por la ecuación (1), donde los factores corresponden: (A: espesor, B: rugosidad y C: longitud).

$$Resistencia = 131,02 + 32,57A + 18,18B + 24,26C + 15,95AC + 12,06BC \quad (1)$$

La validez de los resultados obtenidos del mejor ANOVA logra explicar claramente a través de la gráfica de la figura 8 que los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia de los datos se cumplen sin necesidad de recurrir a un método analítico.

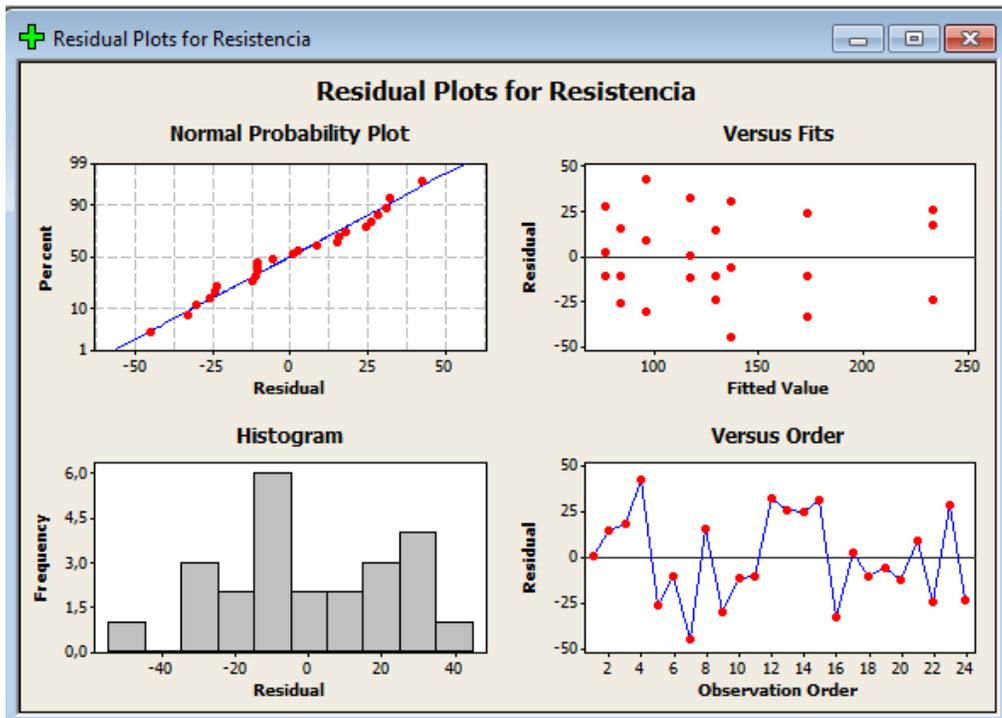


Figura 8. Gráfica de probabilidad normal, histograma, predichos y orden de observación de los residuos.

Con la superficie de respuesta y contornos entre las interacciones más significativas para el mejor ANOVA se tiene información para minimizar o aumentar la resistencia de falla de la junta adhesiva. La gráfica de contornos es más clara para mostrar las áreas de resistencia entre los factores espesor y longitud siendo más amplias que entre rugosidad y longitud. La gráfica de superficie lo ratifica con su vértice más alto, ver figura 9.

Como la longitud en su nivel más alto es el factor más importante para el incremento de la resistencia a la falla, probablemente está cerca de lo que algunas investigaciones llaman “longitud efectiva”, donde el esfuerzo cortante a lo largo de la unión se distribuye más uniformemente, que en su nivel más bajo, minimizando los altos esfuerzos en los bordes [10].

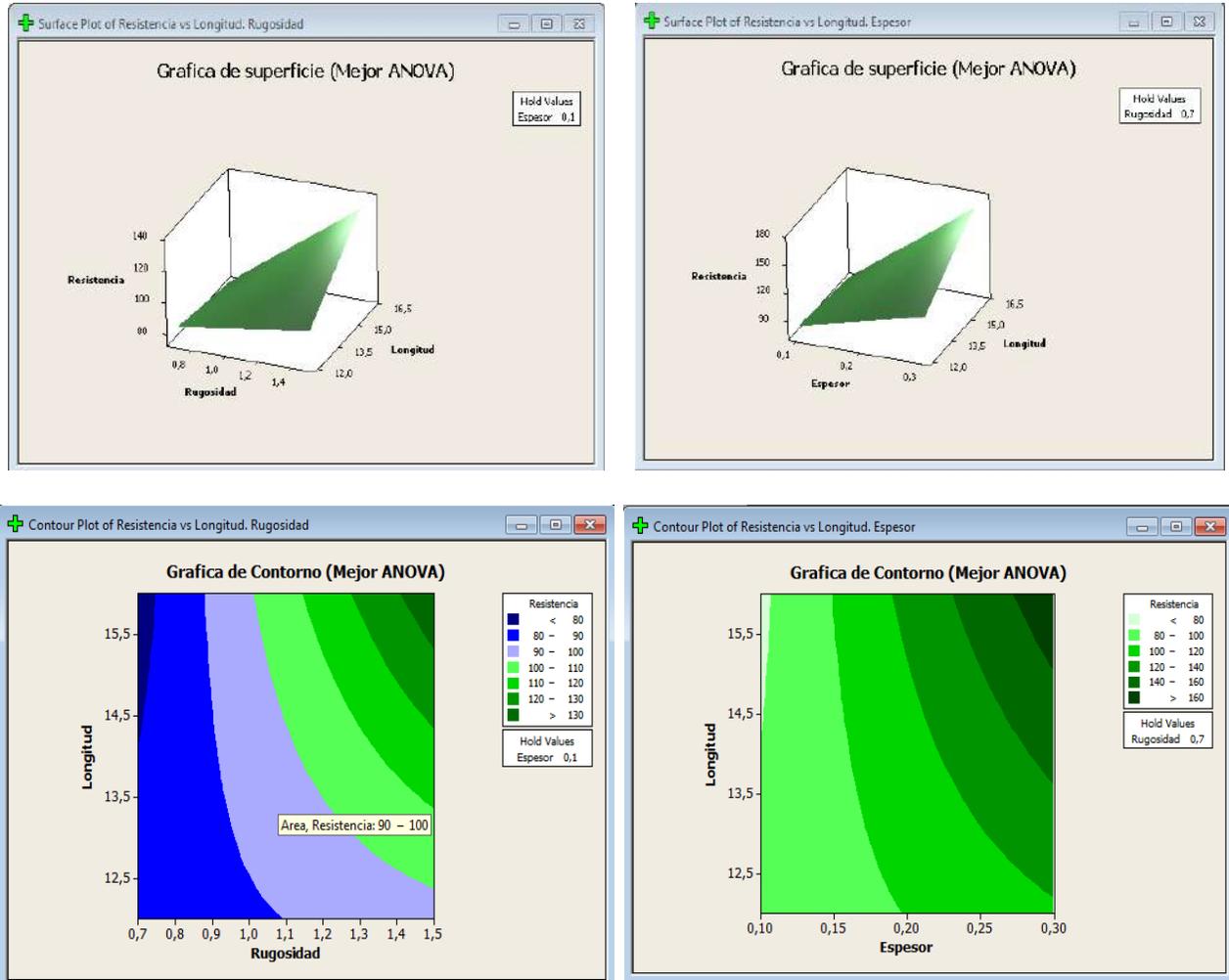


Figura 9. Gráficas de superficie y contornos de las interacciones significativas.

4 CONCLUSIONES

El modelo permite explicar en un 75,68% la variabilidad de los datos, lo cual representa un porcentaje alto, si se considera que este tipo de diseño de unión eje-anillo sometida a torsión, ha tenido poca exploración. Además, el rango de los niveles como los factores representa una buena base para encontrar una región óptima del proceso de ensamble, realizando más replicas.

El factor longitud en su nivel más alto es el más influyente sobre la resistencia a la falla, al combinarse con los otros dos factores, independiente del nivel (alto - bajo), ratificándose más, cuando se evalúa la respuesta predicha con el modelo de regresión. El análisis de varianza en conjunto con el de Pareto, permitió identificar la significancia estadística de cada uno de los parámetros geométricos, mientras que el empleo del modelo de regresión y de superficie de respuesta explicó el comportamiento de la resistencia a la ruptura en la unión adhesiva.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. García, G., Toro, A., Martínez, M. “Diseño de un ensayo de torsión para uniones adhesivas anaeróbicas”. En: VIII Jornadas de Adhesivos, España, Septiembre 26 – 28 de 2007.
2. P. Davies. Influence of adhesive bond line thickness on joint strength, Elsevier, 724 – 736, 2009.
3. Kinloch AJ, Moore DR, The influence of adhesive bond line thickness on the toughness of adhesive joints, in The application of fracture mechanics to polymers, adhesives and composites, ed Moore DR, Elsevier 2149-155, 2004.
4. Kinloch AJ, Adhesion and Adhesives, Science and Technology, Chapman and Hall, 1987.
5. J.W. Kwon, D.G. Lee, The effects of surface roughness and bond thickness on the fatigue life of adhesively bonded tubular single lap joints, J. Adhesion Sci. Technol.14, 1085 – 1102, 2000.
6. Tezcan S. “The effects of surface roughness on the strength of adhesively bonded cylindrical”, J. Materials Processing Technology. 142, 82–86, 2003.
7. García G. Influencia del acabado superficial sobre la resistencia de juntas adhesivas para fijación de elementos cilíndricos. Tesis Maestría, Universidad Nacional, Medellín 2006.
8. Jose M. Arenas, Julian J.Narbon, Cristina Alia. Optimum adhesive thickness in structural adhesives joints using statistical techniques based on Weibull distribution. International journal of adhesion 30. 160-165, 2010
9. Montgomery, Douglas C. Design and Analysis of Experiments. United States of America John Wiley & Sons, Inc , 2004.
10. Hosseinzadeh, Ramin. Taheri, Farid. Non-linear investigation of overlap length effect on torsional capacity of tubular adhesively bonded joints. Composite Structures 91, 186–195, 2009.