

Ensayos de fatiga en viga rotativa para determinar la Constante de Miner del acero AISI 1045

Calibrado comercializado por la Compañía General de Aceros en la ciudad de Barranquilla

Franz Quesada Tatis*, Jacob Charris Jurado**, Juan Pérez Díaz**

*Ingeniero Mecánico. Magíster en Materiales y Procesos. Docente Tiempo Completo Universidad Autónoma del Caribe.
Grupo de Investigación en Materiales, Procesos y Tecnologías de Fabricación – IMTEF. fquesada@uac.edu.co.

**Estudiantes X semestre Programa de Ingeniería Mecánica Universidad Autónoma del Caribe.
Grupo de Investigación en Materiales, Procesos y Tecnologías de Fabricación – IMTEF.

RESUMEN

Como parte del proyecto de investigación a los aceros nacionales, este artículo muestra los resultados de fatiga a flexión rotatoria al acero AISI 1045 calibrado para determinar la Constante de Miner. Previamente se realizaron ensayos preliminares de tensión, metalográficos y dureza, con el objeto de verificar el estado del material; después de fallar las probetas se practica un ensayo de fractografía.

Para determinar la Constante de Miner inicialmente se construyó la curva S-N. En la zona de vida finita se aplica regresión lineal para evaluar el coeficiente de resistencia a la fatiga (Co) y el exponente de resistencia a la fatiga (bo). El Límite de Resistencia a la Fatiga se calcula mediante el método hacia arriba y hacia abajo.

Se utilizan tres niveles de esfuerzos: alto, medio y bajo. Estos niveles de esfuerzos se combinan para observar el efecto del rango de esfuerzos en el valor de la Constante de Miner.

Palabras clave: Ensayo de Fatiga, curva S-N, Constante de Miner, regresión, Límite de Resistencia a la Fatiga.

ABSTRACT

How part of the research project to the nacionales steels, this article shows the results to rotatory flexion fatigue test to steel calibrate AISI 1045 for to determinate the Miner Constant. Preliminary tension test, metallographics and hardness was made. After of failure the specimens, fractography test was practiced.

To determine the Miner Constant initially was made of curve S-N. In zone of finite life is applies lineal regression to assess the coefficient (Co) and exponent of fatigue strength (bo). The Limit fatigue strength is calculated for upwards and downwards metodo.

Is used three level of effort: high, medium and low. This levels of effort is combined to note the efect of the range of effort in asset the Miner Constant.

Keywords: Fatigue test, curve S-N, Miner Constant, regression, Limit of fatigue strength.

INTRODUCCIÓN

La fatiga suele caracterizarse como un fenómeno de falla progresiva que ocurre por el inicio y propagación de grietas hasta un tamaño inestable, lo que hace esencial que el diseñador dirija su atención a las impli-

caciones de cargas repetidas, fluctuantes y aplicadas con rapidez.

Los diseñadores al momento de realizar cálculos estructurales a fatiga tienen que disponer de valores de propiedades mecánicas tales como límite de resistencia

a la fatiga, la curva S-N o valores de la Constante de Miner. Estas propiedades se encuentran normalmente en tablas de textos que son editados en otros países y por lo tanto no corresponden a las propiedades mecánicas de los materiales disponibles o fabricados en nuestro medio.

Adicionalmente, las empresas fabricantes de los aceros nacionales no disponen de información referente al comportamiento a la fatiga. A nivel nacional no es fácil encontrar información relacionado con investigaciones de este tipo, aún a nivel internacional esta es muy escasa.[1], [2]

El propósito de este proyecto es evaluar el comportamiento a la fatiga del acero 1045 calibrado de modo que se pueda comparar con información disponible en los textos especializados y pueda ser utilizada en el diseño de elementos de máquina extrapolando sus resultados con las correcciones que se recomiendan de los datos de laboratorio a los elementos reales de máquina. Hay que tener en cuenta que en el diseño, al utilizar aceros nacionales, es importante disponer de sus valores reales en el comportamiento a la fatiga y no utilizar valores estimados generalizados.

El presente estudio tiene como objetivo determinar la constante de Miner y la para el acero AISI 1045 calibrado. El proyecto está enmarcado dentro de la línea de investigación de materiales.

DISEÑO DE EXPERIMENTO

Las probetas para tracción se prepararon según la norma DIN 53455; el ensayo fue hecho en una máquina universal de ensayo Shimaddzu modelo UHA 100 con capacidad de 100 toneladas.

Para el ensayo metalográfico se tomaron macrofotografías a 50X y 100X en un microscopio metalúrgico óptico OLYMPUS modelo PME3.

Las probetas para fatiga se fabricaron según la norma ASTM E606 – 80, ASTM E206 – 76, ASTM E467 – 76. Para la realización del ensayo se maquinaron 100 probetas en torno CNC, posteriormente se realizó el proceso de acabado superficial con lijas 80, 120, 240, 320, 400, 600, 1200 teniendo cuidado que no presentaran rayaduras.

El tipo de máquina para realizar los ensayos fue la máquina para ensayos a fatiga tipo RR Moore de flexión rotatoria, con velocidades de trabajo entre 2000 y 2800 RPM.

La secuencia de los ensayos fue la siguiente:

- Determinar el Límite de Resistencia a la Fatiga.
- Determinar la curva S-N de vida finita.
- Calcular la Constante de Miner.

Para determinar el Límite de Resistencia a la Fatiga se ensayaron 15 probetas mediante el método Hacia Arriba y Hacia abajo.[3]

Para la curva S-N de vida finita del material se realizaron ensayos a tres niveles de esfuerzos, utilizando 10 probetas para cada nivel y como herramienta estadística la mediana. La curva se determina mediante regresión lineal. Norma ASTM E 468- 76, ASTM E 206-72

Para determinar la Constante de Miner se tomaron 3 niveles de esfuerzos: alto, medio y bajo. Se realizan ensayos para cada combinación de niveles de esfuerzos, tanto en orden ascendente como descendente: alto-medio, medio-alto, alto-bajo, bajo-alto, medio-bajo, bajo-medio. Para cada ensayo se toman 10 probetas y se calcula la Constante de Miner, tomando como valor el promedio.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Ensayos preliminares

3.1.1 Ensayo de tensión. Se les practicó un ensayo de tracción al acero AISI 1045 calibrado. El esfuerzo de fluencia es de 829,3 MPa y el último de 960,6 MPa. En la Tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo a tracción.

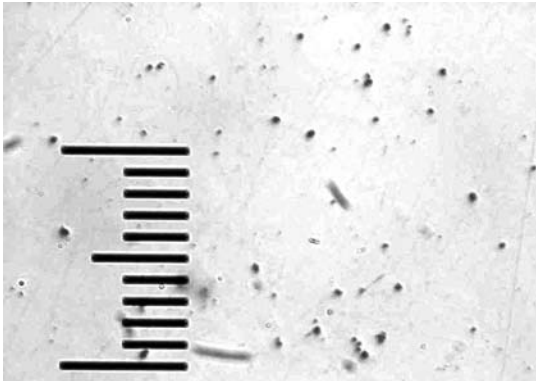
La relación S_y / S_{ut} es 0.86 para el acero 1045, por lo tanto, al realizarse el ensayo de fatiga con relaciones de esfuerzo aplicado- esfuerzo último menores a estos valores, siempre se encuentra en la zona elástica.[4]

Tabla 1. Propiedades mecánicas del ensayo a tracción para el acero AISI 1045 calibrado.

Acero AISI 1045 calibrado	
Material	AISI 1045
Estado	Calibrado
Esfuerzo de fluencia	829.3 MPa
Esfuerzo último S_u	960.6 MPa
Relación S_y/S_{ut}	0.86

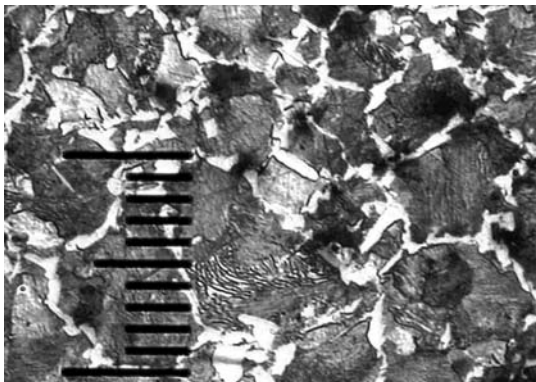
Ensayos metalográficos. En la Figura 1 se muestra la microestructura del material a 50 aumentos del Acero AISI 1045 calibrado. En ella se observan inclusiones que posiblemente pueden ser óxidos tipo D y sulfatos tipo A, productos del proceso de fabricación. Ver Norma ASTM E45 / E381

Figura 1. Fotomicrografía del acero AISI 1045 calibrado sin atacar a 50 X



En la Figura 2 se observa la microestructura a 100 aumentos, encontramos zonas claras de ferrita en una matriz perlítica. De acuerdo a la figura, el porcentaje de perlita es aproximadamente del 60%.

Figura 2. Fotomicrografía del acero AISI 1045 calibrado atacada con nital al 3% a 100 X



3.1.3 Ensayo de Dureza

En la Tabla 2 se encuentran los valores de durezas medidos y los entregados por el distribuidor (catálogo). Se realizaron tres mediciones de dureza en lugares distintos de la muestra, el valor promedio de la dureza 300 HV (829.7 HRC), esta dureza nos muestra que material esta dentro del rango que brinda el fabricante.

Tabla 2. Ensayo de Dureza para el acero AISI 1045 calibrado

Muestra	HV	HRC
1	29	294
2	28,4	289
3	31,8	316
Promedio	29,7	300
Catálogo	30/10	250/280

3.2. Ensayo de Fatiga

3.2.1 Cálculo del Límite de Resistencia a la Fatiga

Para determinar el límite de resistencia a la fatiga se utiliza el método “hacia arriba y hacia abajo”.

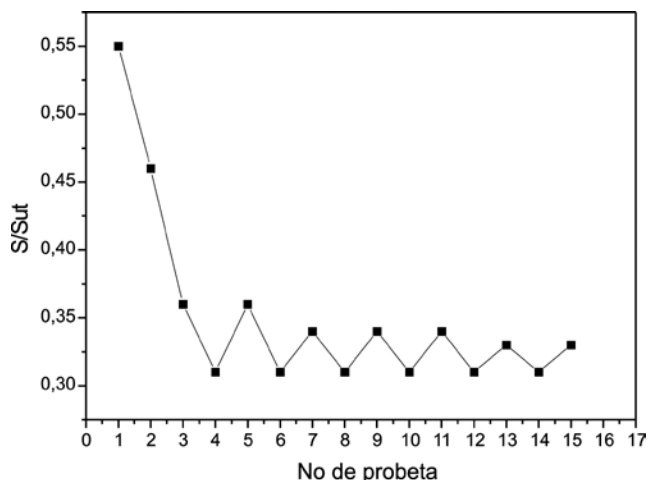
En la Tabla 3 se encuentra los datos necesarios para el ensayo. Se utilizaron seis (6) niveles de esfuerzos; inicialmente se toma un nivel de esfuerzo cuya relación con respecto al esfuerzo último es de 0,55[5], valor que está muy cerca de los valores de referencia reportados por algunos autores.

La Figura 3 muestra la secuencia del ensayo. A partir del ensayo número 6 se observa estabilidad en el ensayo, siendo 0,31 la relación de esfuerzos para la cual no falla la probeta y 0,34 a la cual falla. Para efecto de afinar los cálculos, se toma una relación de esfuerzos de 0,33 para la cual se da la falla. Por lo tanto se toma el Límite de Resistencia a la Fatiga para una relación de 0.31 (305.1 Mpa).

Tabla 3. Información sobre las probetas usadas en el método “Arriba y Abajo”. Acero AISI 1045 calibrado.

Método Hacia arriba y hacia Abajo	
Material	AISI 1045 calibrado
Número de probetas	15
Nivel de esfuerzos en orden descendente S/S _{ut}	0.55 – 0.45 – 0.36 – 0.34 – 0.33 – 0.31
Incremento de esfuerzo S _{ut}	0.1 – 0.05 – 0.02

Figura 3. Diagrama “Arriba y Abajo” para el acero AISI 1045 calibrado.



El límite a fatiga para el acero AISI 1045 calibrado fue de 305.1 Mpa
 Se = 0.31 Sut

Se = 305.1 Mpa

La desviación estándar de los datos es:

s = 1.32 Mpa

Algunos autores reportan como Límite de Resistencia a la Fatiga 0,5 Sut [5], otros determinan un rango de 0,23 a 0,65 Sut.[6]

3.2.2 Curva S-N vida finita

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el ensayo para determinar el Límite de Resistencia a la Fatiga, se seleccionan los valores de la relación de esfuerzos: 0,38 – 0,36 – 0,34 para efecto de construir la curva; estas relaciones son menores a 0,86 (Ver Tabla 1), por lo tanto los esfuerzos están en el rango elástico. Para cada nivel de esfuerzos se ensayaron 10 probetas, para determinar el número de ciclos a la cual se presentó la falla se seleccionó la mediana. Ver Tabla 4.

Se construyó el diagrama S-N que se muestra en la Figura 4, utilizando como variable dependiente el logaritmo en base 10 de la mediana de los ciclos, y como variable independiente, el logaritmo del esfuerzo.

Tabla 4. Información sobre la definición de los niveles de esfuerzo Acero AISI 1045 calibrado.

Niveles de esfuerzo del acero AISI 1045 calibrado	
Número de niveles	3
Probetas por nivel	10
% de esfuerzo	0.38, 0.36, 0.34

Los puntos del diagrama de la Figura 4 son los datos reales obtenidos del ensayo, la curva de regresión se ajustó usando el método de mínimos cuadrados.

Los valores del intercepto y la pendiente, que corresponden al valor de el coeficiente y el exponente de resistencia a la fatiga respectivamente son los que se muestran en la tabla 8.

La ecuación en escala lineal es de la forma
 $S = C_o N^{b_o}$ (1)

Donde:
 N= número de ciclos
 S= Esfuerzo

Figura 4. Diagrama S-N logarítmico para vida fina del Acero AISI 1045 calibrado

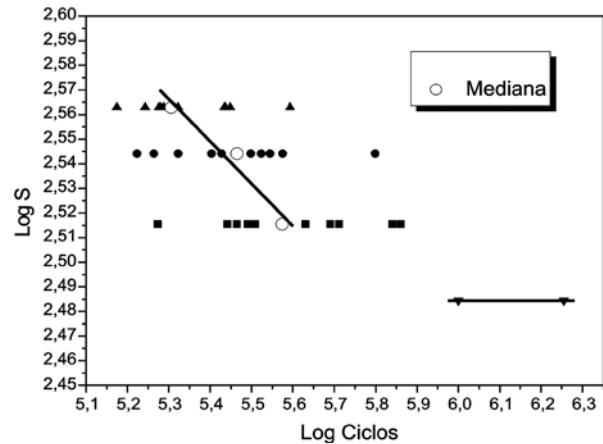


Tabla 5. Valores de los coeficientes y exponentes de resistencia a la fatiga Acero 1045 calibrado

Resultados de regresión	
c_o	0.169
b_o	-3.646

Reemplazando los coeficientes

$$S = -0.169 N^{-3.646}$$

El coeficiente de correlación de la regresión lineal es de 0,94, es decir, el 88% de las variaciones de los valores de ciclos de falla está explicado por una relación lineal con los esfuerzos. Lo anterior indica una buena relación lineal entre las variables.

Calculado el COV para los datos obtenido, este es 0,82 siendo este un buen indicativo de la incertidumbre en la curva S-N. De acuerdo a Paul Veers, el COV debe ser mayor de 0,6. [7]

3.2.3 Constante de Miner

Para calcular la constante de Miner se toman tres niveles de esfuerzos: alto (365 MPa), medio (350 MPa) y bajo (327 MPa). Se realizaron ensayos sometiendo las probetas a dos niveles de esfuerzos: primeramente a "n1" ciclos (predeterminados) a un nivel de esfuerzos y después a un segundo nivel de esfuerzos hasta la rotura; la combinación de los esfuerzos se estableció tanto en forma ascendente como descendente; se utilizaron 10 probetas para cada combinación (Ver Tabla 6). Por lo tanto la ecuación de daño acumulativo es:

$$n_i/N_i + n_{i+1}/N_{i+1} = C \quad (2)$$

Donde:
 C= Constante de Miner
 n_i= número de ciclos a la cual trabaja la probeta para el nivel de esfuerzo inicial (preestablecidos)

N_i= número de ciclos de falla para el nivel de esfuerzo inicial (de la ecuación 1)
 n_{i+1}=número de ciclos a la cual falla la probeta en el segundo nivel de esfuerzos
 N_{i+1}= número de ciclos de falla en el segundo nivel de esfuerzo (de la ecuación 1).

Para seleccionar el “n1” ciclo inicial, se aplicó la Distribución de Weibull a los datos utilizados para determinar la curva S-N de vida finita, esto con el fin de garantizar que “n1” quedase fuera de la distribución, de lo contrario podría darse la probabilidad de que fallara a este nivel de esfuerzo.

Para cada probeta se calcula la Constante de Miner y se calcula una constante promedio para los 10 ensayos de cada combinación.

Tabla 6. Datos iniciales para determinar la Constante de Miner

	Valor Esfuerzo (Log)	n _i ciclos preestablecidos	N _i ciclos (Log)
Nivel de esfuerzo alto	365 Mpa (2,562293)	83000	216543,1 (5,335544)
Nivel de esfuerzo medio	350 Mpa (2,544688)	83000	275242,9 (5,43971)
Nivel de esfuerzo bajo	327 Mpa (2,515609)	93750	409054,4 (5,61178)

En la Tabla 7 se encuentran los resultados consolidados del ensayo

Cálculo tipo

A manera de ejemplo se realiza un cálculo tipo para el nivel Bajo – Alto. Ver Tabla 6 y 7.

De la Tabla 7

n₁= 93750 (al primer nivel de esfuerzo bajo-predeterminado)

N₁= 409054,4 (De la ecuación 1, calculado con el esfuerzo de 327 MPa-esfuerzo bajo)

N₂= 216543 (De la ecuación 1, calculado con el esfuerzo de 365 MPa-esfuerzo alto)

De la Tabla 8

n₂= 232446 (número de ciclos a la cual falla la probeta al nivel alto)

Aplicando la Ecuación (2)

$$C = \frac{93750}{109054} + \frac{232446}{216543} = 1.30$$

Tabla 7 . Recolección de datos para la constante de Miner.

Bajo - alto	n2	232446	188300	483520	280046	168300	196000	215330	264500	388469	398200	C.med
	Ci	1.30	1.10	2.24	1.52	1.01	1.13	1.22	1.45	2.02	2.07	1.38
Bajo – medio	n2	245000	442400	408800	485330	397000	356000	576800	593600	473200	417200	1.79
	Ci	1.12	1.84	1.71	2	1.67	1.52	2.32	2.38	1.94	1.74	
Medio – Alto	n2	72800	90766	127073	138880	131600	135706	131131	166544	110040	173768	0.91
	Ci	0.64	0.72	1.89	0.94	0.91	0.93	0.91	1.07	0.81	1.11	
Medio - Bajo	n2	644784	274820	115500	135100	163044	175000	274540	120950	218400	252056	0.78
	Ci	1.88	0.98	0.59	0.63	0.70	0.73	0.97	0.60	0.84	0.92	
Alto – Medio	n2	114286	130900	125300	282266	286860	323360	189560	223450	261844	165240	1.13
	Ci	0.80	0.86	0.84	1.41	1.43	1.56	1.07	1.20	1.34	0.99	
Alto - Bajo	n2	212540	205146	198520	254340	210500	290300	245380	223800	236420	327800	0.94

De acuerdo con los resultados obtenidos de la Constante de Miner promedio, estos valores se encuentran entre 0,78 y 1,79. Para algunos autores reportan valores entre 0,7 y 2.2 [8].

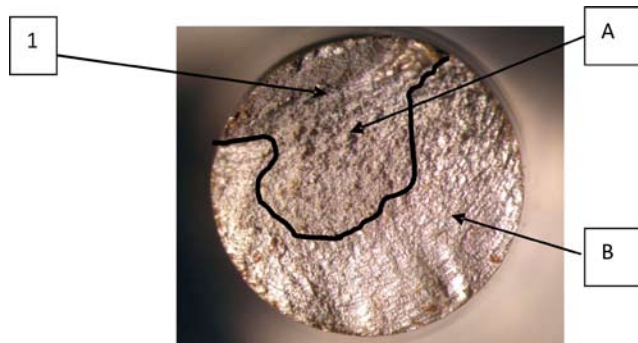
De acuerdo con los resultados, los valores más altos de Constantes se dan con las combinaciones de esfuerzos bajo-alto y bajo medio, 1,79 y 1,38 respectivamente; esto se puede explicar porque el daño causado es pequeño en razón a los bajos esfuerzos, sucediendo todo lo contrario con los ciclos de esfuerzos alto-bajo y medio-bajo (0,94 y 0,78 respectivamente). Lo anterior significa que el sentido de los esfuerzos influye en la resistencia al daño.

Cuando se inicia con un nivel de esfuerzo bajo se tiene una resistencia al daño mayor, arrojando valores de C relativamente altos, en comparación con el nivel alto y medio.

3.3. Ensayos posteriores. Ensayo fractográfico

El objetivo de este ensayo es verificar si se presentó el fenómeno de fatiga y como se dio.

Figura 5. Fotografía de probeta del acero AISI 1045 calibrado 2x



En la Figura 5 se observa dos zonas: una zona basta y oscura A, otra con marcas de playa y brillante B. Esta última muestra el fenómeno de fatiga. La zona brillante que muestra las marcas de playa, nos confirma que es fatiga y la zona oscura es donde ocurre la falla. En 1 se observa un labio y es donde se presenta la ruptura súbita; el inicio de la falla por fatiga se presenta en múltiples puntos sobre la superficie, extendiéndose hacia el centro.

CONCLUSIONES

El límite a la resistencia a la fatiga obtuvo en los ensayos para el acero AISI 1045 calibrado comercializado por la Compañía General de Aceros, en la ciudad de Barranquilla, es de 305.1 MPa.

El valor encontrado del Límite de Resistencia a la fatiga corresponde a 0,31 de Sut .

La ecuación para la vida infinita del acero AISI 1045 calibrado es:

$$S = -0.169 N^{-3.464}$$

La Constante de Miner esté dentro del rango $0.78 > C < 1.79$.

Para el caso de daño acumulativo, cuando se inicia con un nivel de esfuerzo bajo se tiene una mayor resistencia al daño, dándose valores de C relativamente altos en comparación con el nivel alto y medio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]OLLER, S. SUERO, A. Tratamiento del fenómeno de fatiga isotérmico mediante la mecánica de medios continuos. Revista Internacional de Medios Continuos y diseño en Ingeniería. Vol. 15,1, 11-133(1999).

[2]VALENCIA, N. Determinación de la curva S-N en fatiga rotatoria de las aleaciones de aluminio 2024-T3 y 7075-T7361 y su dependencia con los tratamientos superficiales. Jornadas Sam/Conamet/Simposio Ma-teia 2003.

[3] MYER, Kute. *Enciclopedia de la mecánica, ingeniería y técnica*. Vol 2. Grupo Ed. Océano, Barcelona, España. 1990. ISBN 84-7841-032-5.

[4] QUESADA, Franz. Consideraciones sobre el cálculo de los esfuerzos en el ensayo a fatiga por flexión rotatoria. Prospectiva, Vol. 4 No2 Jul-Dic 2006, pág.

[5] SHIGLEY, Joseph Edwar y MISCHKE, Charles R. *Diseño en ingeniería mecánica: carga variable*. 5 ed. México: Mc Graw Hill, 1990. P. 312.

[6]FAIRES, Virgil. *Diseño de Elementos de Máquinas*. Ed. Uthea, México. 1990. ISBN 968-438-040-2. P. 162

[7] VEERS, Paul. *Statical Considerations in Fatigue*. Sandia nacional Laboratorios.

[8] SHIGLEY, Joseph Edwar y MISCHKE, Charles R. *Diseño en ingeniería mecánica: carga variable*. 5 ed. México: Mc Graw Hill, 1990. P. 348.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

KOTHLEENS, Drogolich. KELLY, Ferrtuz. ASM HAN-DBOOK: fatiga y fractura 1974. V.19, p. 198.

NORTON, Robert L. *Diseño de máquinas: Teorías de fallas por fatiga*. 1ed. Mexico: Pearson, 1999. p. 359-368

SHIGLEY, Joseph Edwar y MISCHKE, Charles R. *Diseño en ingeniería mecánica: diseño de elementos roscados y de sujeción diversa*. 5 ed. México: Mc Graw Hill, 1990. P. 406

STEPHEN P, Shao Ph D. *Estadística para economistas y administradores de empresas: promedios: mediana, media aritmética, moda*. 15 ed. México: Herrero hermanos, 1979.P.152-196