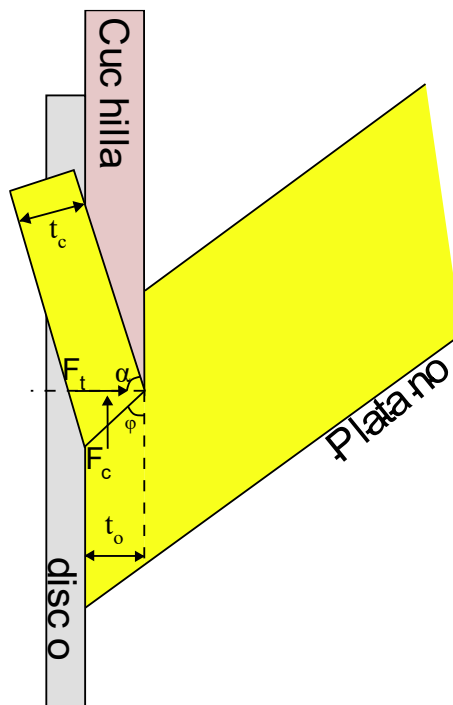


Apéndice G. Diseño Cuchilla

El diseño de la cuchilla inició con el cálculo de su espesor t_o , el ángulo de ataque α , el ángulo de cizallamiento φ y la fuerza de empuje resultante F_t generada durante el proceso de rebanado. El material para la cuchilla es un acero inoxidable al cromo.

Figura G1

Corte Ortogonal del Rebanador de Plátano



Para este cálculo se empleó el modelo de corte ortogonal de Merchant, utilizando los datos conocidos mencionados en la Tabla G1. A partir de estos valores, se implementaron las siguientes ecuaciones:

$$\varphi = 45^\circ - \frac{\beta}{2} + \frac{\alpha}{2} \quad (G1)$$

$$t_o = t_c * \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \alpha)} \quad (G2)$$

$$F_t = F_c \tan(\beta - \alpha) \quad (G3)$$

Tabla G1

Datos Iniciales

Descripción	Símbolo	Valor	Unid
Espesor de la rebanada	t_c	0,004	m
Fuerza de corte	F_c	65,07	N
Coefficiente de fricción	μ	0,583	
Angulo de fricción	β	30,24	°

Dado que se tiene 4 incógnitas y solo tres ecuaciones, mediante un libro de *Excel*, se realizaron las operaciones correspondientes dando valores a α desde 0° hasta 89°, dando como resultado Tabla G2.

Tabla G2

Resultados del Modelo de Merchant

Angulo de ataque [°] α	Angulo de Cizallamiento [°] φ	Espesor de la cuchilla [m] t_o	Fuerza de empuje [N] F_t
0	29,879	0,00230	37,936
1	30,379	0,00232	36,429
2	30,879	0,00234	34,952
3	31,379	0,00237	33,502
4	31,879	0,00239	32,078
5	32,379	0,00241	30,678
6	32,879	0,00243	29,301
7	33,379	0,00246	27,946
8	33,879	0,00248	26,610
9	34,379	0,00250	25,294

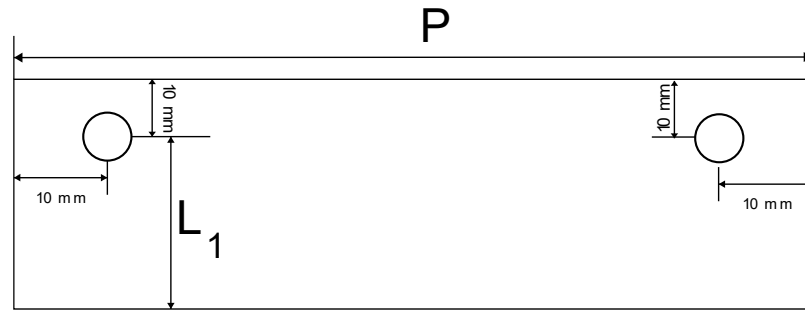
Angulo de ataque [°] α	Angulo de Cizallamiento [°] φ	Espesor de la cuchilla [m] t_o	Fuerza de empuje [N] F_t
10	34,879	0,00252	23,996
11	35,379	0,00254	22,714
12	35,879	0,00256	21,447
13	36,379	0,00258	20,195
14	36,879	0,00261	18,957
15	37,379	0,00263	17,731
16	37,879	0,00265	16,516
17	38,379	0,00267	15,313
18	38,879	0,00269	14,119
19	39,379	0,00271	12,934
20	39,879	0,00273	11,757
21	40,379	0,00275	10,588
22	40,879	0,00277	9,426
23	41,379	0,00279	8,269
24	41,879	0,00281	7,117
25	42,379	0,00283	5,970
26	42,879	0,00284	4,827
27	43,379	0,00286	3,686
28	43,879	0,00288	2,548
29	44,379	0,00290	1,411
30	44,879	0,00292	0,275
31	45,379	0,00294	-0,861
32	45,879	0,00296	-1,997
33	46,379	0,00298	-3,134
34	46,879	0,00299	-4,274
35	47,379	0,00301	-5,416
36	47,879	0,00303	-6,561
37	48,379	0,00305	-7,711
38	48,879	0,00307	-8,865
39	49,379	0,00309	-10,024
40	49,879	0,00310	-11,190
41	50,379	0,00312	-12,363
42	50,879	0,00314	-13,544
43	51,379	0,00316	-14,733
44	51,879	0,00318	-15,932
45	52,379	0,00319	-17,141
46	52,879	0,00321	-18,361
47	53,379	0,00323	-19,594
48	53,879	0,00325	-20,839
49	54,379	0,00327	-22,098

Angulo de ataque [°] α	Angulo de Cizallamiento [°] φ	Espesor de la cuchilla [m] t_o	Fuerza de empuje [N] F_t
50	54,879	0,00328	-23,373
51	55,379	0,00330	-24,663
52	55,879	0,00332	-25,971
53	56,379	0,00334	-27,297
54	56,879	0,00335	-28,642
55	57,379	0,00337	-30,008
56	57,879	0,00339	-31,397
57	58,379	0,00341	-32,809
58	58,879	0,00342	-34,246
59	59,379	0,00344	-35,710
60	59,879	0,00346	-37,202
61	60,379	0,00348	-38,725
62	60,879	0,00350	-40,279
63	61,379	0,00351	-41,867
64	61,879	0,00353	-43,491
65	62,379	0,00355	-45,154
66	62,879	0,00357	-46,857
67	63,379	0,00358	-48,604
68	63,879	0,00360	-50,397
69	64,379	0,00362	-52,239
70	64,879	0,00364	-54,133
71	65,379	0,00365	-56,083
72	65,879	0,00367	-58,093
73	66,379	0,00369	-60,167
74	66,879	0,00371	-62,308
75	67,379	0,00373	-64,522
76	67,879	0,00374	-66,814
77	68,379	0,00376	-69,190
78	68,879	0,00378	-71,656
79	69,379	0,00380	-74,219
80	69,879	0,00382	-76,885
81	70,379	0,00383	-79,664
82	70,879	0,00385	-82,564
83	71,379	0,00387	-85,596
84	71,879	0,00389	-88,770
85	72,379	0,00391	-92,099
86	72,879	0,00393	-95,596
87	73,379	0,00394	-99,278
88	73,879	0,00396	-103,161
89	74,379	0,00398	-107,265

Antes de realizar el análisis de resistencia en la cuchilla es fundamental establecer la distancia L_1 comprendida entre el filo de corte y el punto medio del orificio donde estará el tornillo que asegura la unión de la cuchilla con el disco, así como el ancho total P de la cuchilla. Se estableció la utilización de dos puntos de sujeción, ubicados a 10 mm tanto en sentido horizontal como vertical de las esquinas opuestas al filo (Figura G2).

Figura G2

Vista Superior de la Cuchilla Acotada.

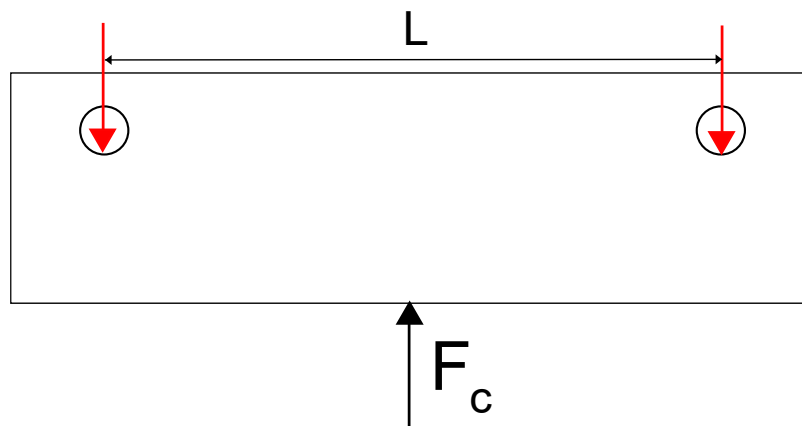


Considerando la fuerza de corte como una carga puntual ubicada en el punto medio de la cuchilla, se realizó el análisis de la deflexión máxima a partir de la ecuación (G4). Donde I es el momento de inercia, L la distancia entre el centro de los dos orificios para $P = 90$ y 110 mm y E es el módulo de elasticidad del material, cuyo valor es de 200 GPa. Para el Cálculo del momento de inercia solo se consideró la geometría transversal comprendida entre el filo y el punto medio de los orificios.

$$\delta_{defle} = \frac{F_c * L^3}{30 * E * I} \quad (G4)$$

Figura G3

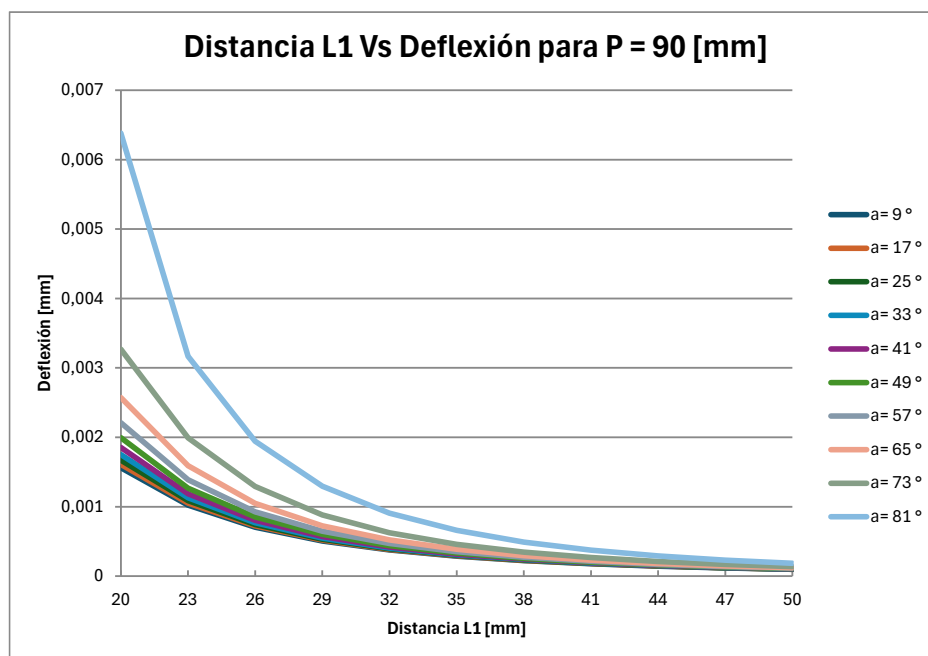
Diagrama de Fuerza para el Análisis de Deflexión



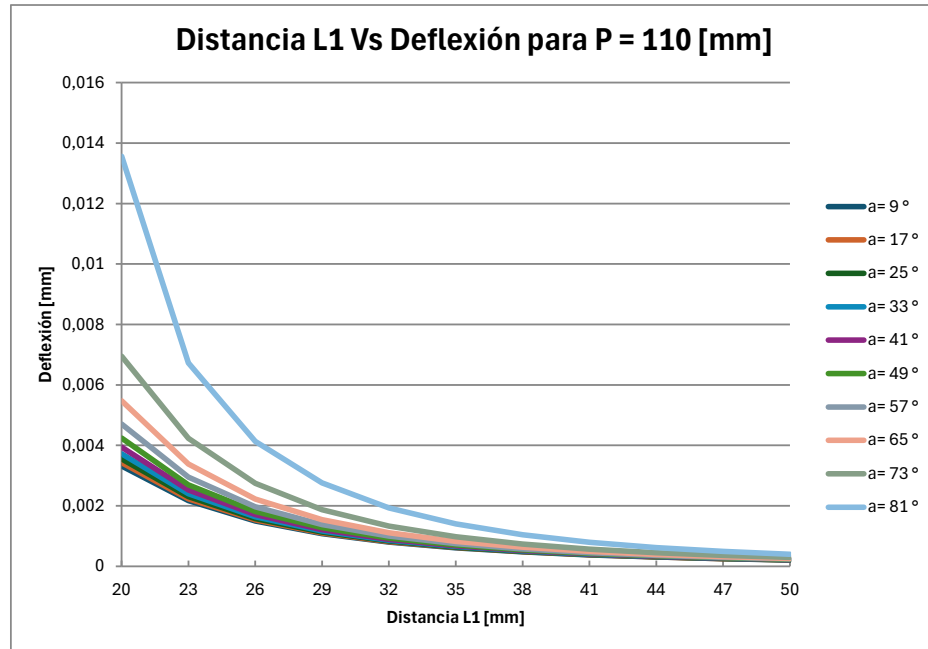
Resolviendo la ecuación, se obtiene la Figura G4. Del análisis de los resultados se observa que a partir de $L_1 \geq 32$ [mm], la deflexión no supera los $2 \mu m$. Por tanto, se decidió establecer un valor $L_1 = 35$ [mm].

Figura G4

Distancia L_1 Vs Deflexión



(a)



(b)

Posteriormente, se calculó el diámetro mínimo de los tornillos de sujeción, considerando que se emplearán tornillos de cabeza avellanada fabricados en acero inoxidable con especificaciones A2-70, con un esfuerzo permisible de $\tau = 350$ MPa. Para el cálculo, se aplicó las ecuaciones (G5 y (G6, Donde V_c la fuerza soportada por cada tornillo y D_{min} es el diámetro del tornillo.

$$V_c = \frac{F_c}{2} \quad (G5)$$

$$D_{min} = \sqrt{\frac{4V_c}{\pi * \tau}} \quad (G6)$$

$$D_{min} = 0,487 [mm]$$

Determinado el diámetro mínimo requerido, se procedió a revisar la disponibilidad en el mercado, encontrándose que el tornillo con dichas especificaciones de menor diámetro

correspondía a un M5, donde el diámetro mayor es de 11,2 [mm]. En consecuencia, este valor se adoptó como el diámetro de cada uno de los orificios de la cuchilla.

Se realizaron los cálculos de resistencia a la fatiga y, a continuación, se presentaron los resultados para un ancho de la cuchilla $P = 110$ mm y un ángulo de ataque de 74° . No obstante, el análisis completo se llevó a cabo considerando los valores de $P = 90$ y 110 mm, así como todos los ángulos de ataque evaluados. En la Tabla G3, se presentan los datos iniciales para el análisis de la resistencia.

Figura G5

Vista Lateral de la Cuchilla - Dimensiones y DCL.

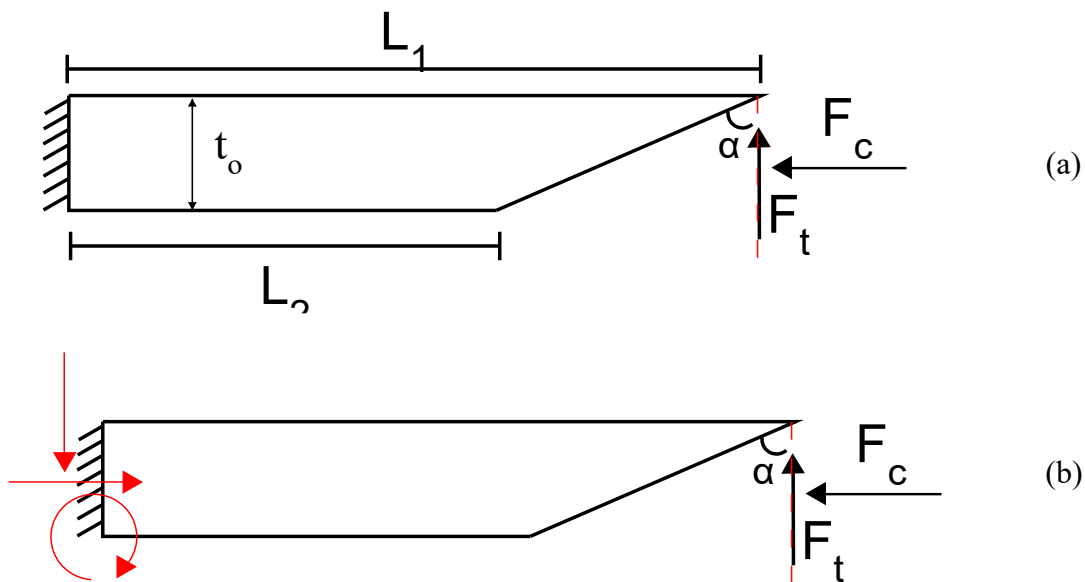


Tabla G3*Datos Iniciales del Análisis de Resistencia*

Descripción	Símbolo	Valor	Unid
Angulo de ataque	α	74	°
Espesor de la cuchilla	t_o	3,707	mm
Longitud mayor	L_1	35	mm
Longitud menor	L_2	22,07	mm
Ancho de la cuchilla	P	110	mm
Fuerza de Corte	F_c	65,07	N
Fuerza de empuje	F_t	62,308	N

En la Figura G5b se muestra el diagrama de cuerpo libre de la cuchilla, y se formularon las siguientes ecuaciones:

$$\sum F_y = 0 \quad (G7)$$

$$R_y = F_t$$

$$R_y = 62,308 [N]$$

$$\sum F_x = 0 \quad (G8)$$

$$R_x = F_c$$

$$R_x = 65,07 [N]$$

$$\sum M = 0 \quad (G9)$$

$$M_R = F_t * L_1$$

$$M_R = 2,181 [Nm]$$

A partir de los datos obtenidos se procedió a realizar los diagramas de fuerza axial, cortante y de momento flector.

Figura G6

Diagrama de Fuerza Axial

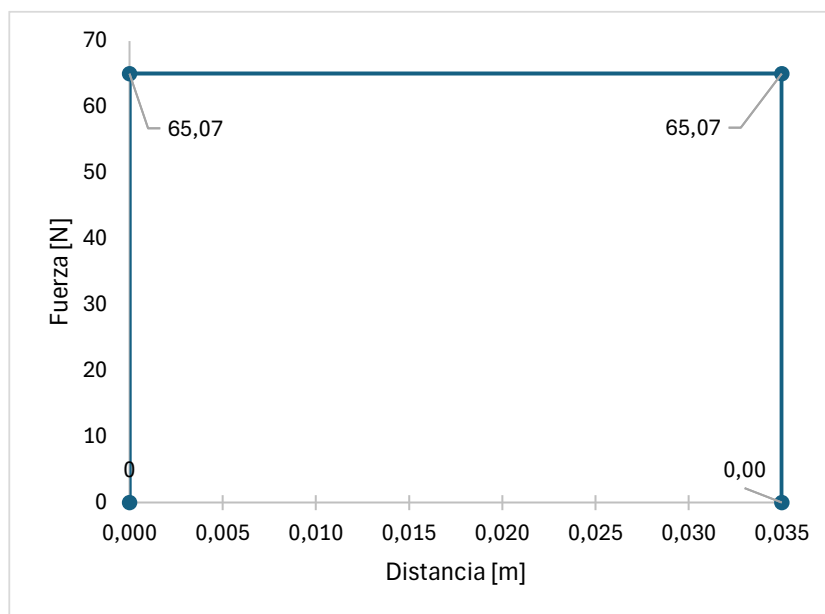


Figura G7

Diagrama de Fuerza Cortante

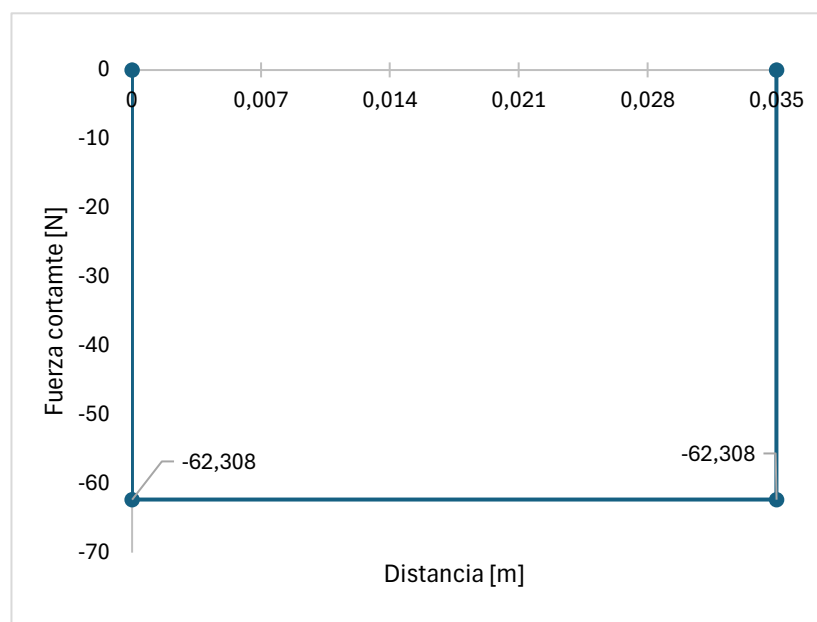
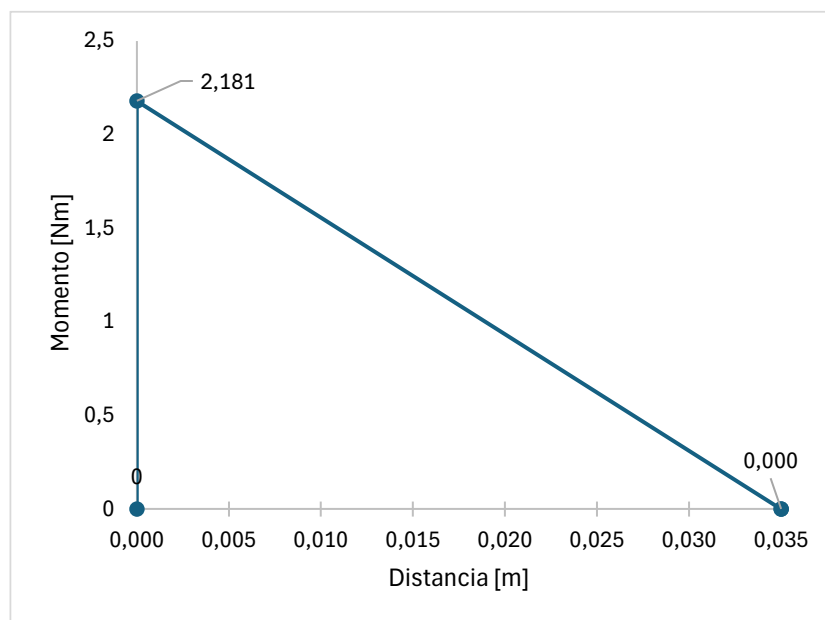


Figura G8

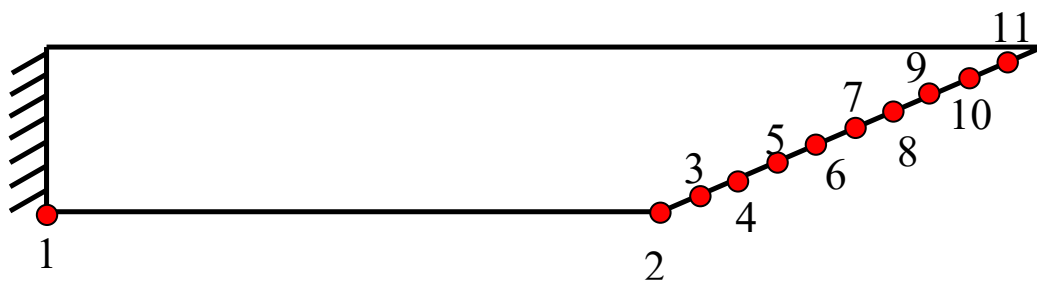
Diagrama de Momento Flector



A partir de los diagramas obtenidos, se decidió analizar 11 secciones a lo largo de la cuchilla (Figura G9). Una de las secciones corresponde a la zona empotrada, otra donde se produce el cambio de sección en la cuchilla y los nueve restantes se distribuyen a lo largo de la cara de ataque de la cuchilla.

Figura G9

Secciones de Análisis de la Cuchilla



Los esfuerzos generados en cada sección están en la Tabla G4.

Tabla G4

Esfuerzo Generados en la Cuchilla

Secciones		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Distancia	dist	m	0	0,022	0,023	0,025	0,026	0,027	0,029	0,030	0,031	0,032	0,034
Fuerza Axial	F_A	N	65,07	65,07	65,07	65,07	65,07	65,07	65,07	65,07	65,07	65,07	65,07
Fuerza Cortante	V	N	-62,308	-62,308	-62,308	-62,308	-62,308	-62,308	-62,308	-62,308	-62,308	-62,308	-62,308
Momento Flector	M	Nm	2,181	0,806	0,725	0,644	0,564	0,483	0,403	0,322	0,242	0,161	0,081
Espesor	e	m	3,71E-03	3,71E-03	3,34E-03	2,97E-03	2,60E-03	2,22E-03	1,85E-03	1,48E-03	1,11E-03	7,41E-04	3,71E-04
Area transversal	A	m ²	4,08E-04	4,08E-04	3,67E-04	3,26E-04	2,85E-04	2,45E-04	2,04E-04	1,63E-04	1,22E-04	8,16E-05	4,08E-05
Momento de Inercia	I	m ⁴	4,6707E-10	4,6707E-10	3,405E-10	2,3914E-10	1,6021E-10	1,0089E-10	5,8384E-11	2,9893E-11	1,2611E-11	3,7366E-12	4,6707E-13
Esfuerzo momento	σ_{Mr}	Pa	8654734	3197036,06	3552262,29	3996295,07	4567194,37	5328393,43	6394072,11	7992590,14	10656786,9	15985180,3	31970360,6
Esfuerzo Cortante	τ_v	Pa	-229183,834	-229183,834	-254648,705	-286479,793	-327405,478	-381973,057	-458367,669	-572959,586	-763946,114	-1145919,17	-2291838,34
Esfuerzo Axial	σ_A	Pa	159562,132	159562,132	177291,257	199452,665	227945,902	265936,886	319124,263	398905,329	531873,772	797810,658	1595621,32

Se procedió a calcular los factores que afectan la resistencia a la fatiga. La cuchilla, al fabricarse con acero inoxidable al cromo, Presentan un límite de fluencia $S_y = 172$ Mpa y una resistencia ultima a la tracción $S_{ut} = 413$ Mpa. Primero, se determinó el factor por superficie mediante la Tabla G5, seleccionando los parámetros correspondientes a la condición “Maquinado o laminado en frío”, y posteriormente solucionando la ecuación (G10). Este valor será el mismo para todas las secciones.

Tabla G5

Parámetros para el Factor por Superficie

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} , kpsi	S_{ut} , MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Nota: Tomado de *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9.^a ed., p. 274), por R. G. Budynas y J. K. Nisbett, 2012, McGraw-Hill.

$$k_a = aS_{ut}^b \quad (G10)$$

$$k_a = 0,914$$

Posteriormente, se determinó el factor por tamaño. En Primer lugar, se calculó el diámetro equivalente de las secciones transversales aplicando la ecuación (G11, y después se obtuvo el valor del factor k_b según corresponda de la ecuación (G12).

$$d_e = 0,808\sqrt{e * P} \quad (G11)$$

$$k_b = \begin{cases} 1,24d^{-0.107} & 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1,51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (\text{G12})$$

El factor de Carga k_c , se seleccionó a partir de la ecuación (G13) . Para el análisis se adoptó el valor más crítico aplicable.

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{Flexión} \\ 0.85 & \text{Axial} \\ 0.59 & \text{Torsión} \end{cases} \quad (\text{G13})$$

Nota: Tomado de *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9.^a ed., p. 277), por R. G. Budynas y J. K. Nisbett, 2012, McGraw-Hill.

Para el factor por temperatura k_d , se tomo un valor igual a 1, por la relativa baja temperatura a la que estará trabajando (50 °C). El factor de confiabilidad k_e , se tomó por la Tabla G6, aplicando una confiabilidad del 99,9 %.

Tabla G6

Factor de Confiabilidad

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidadr k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Nota: Tomado de *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9.^a ed., p. 279), por R. G. Budynas y J. K. Nisbett, 2012, McGraw-Hill.

Se determinó la concentración de esfuerzo por el orificio del tornillo avellanado de los esfuerzos normales (ecuación (G14).

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad (G14)$$

Donde,

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} \quad (G15)$$

$$q = 0,8103$$

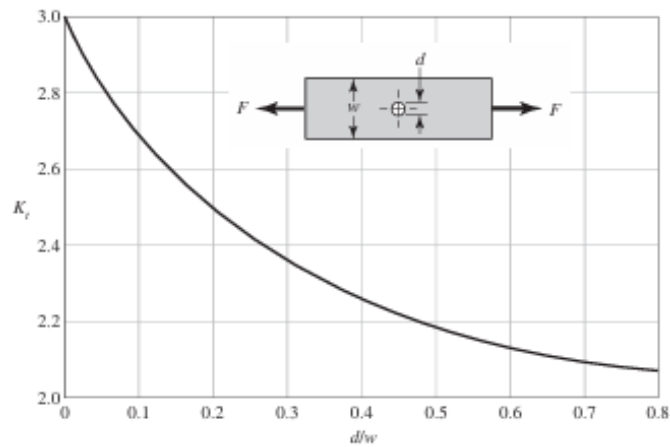
$$\sqrt{a} = 0.246 - 3.08(10^{-3})S_{ut} + 1.51(10^{-5})S_{ut}^2 - 2.67(10^{-8})S_{ut}^3 \quad (G16)$$

$$\sqrt{a} = 0,1099$$

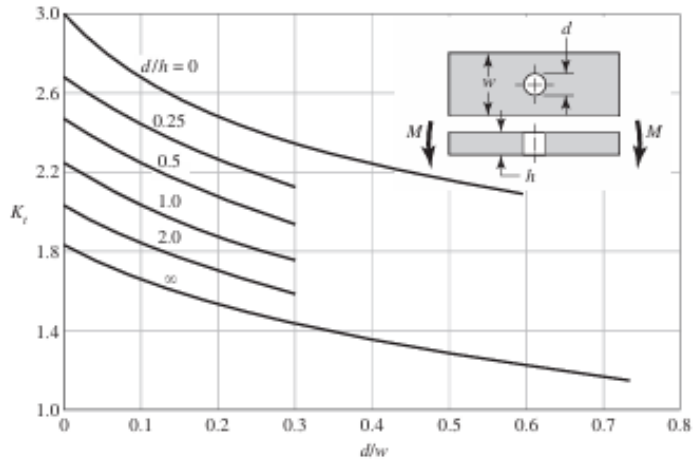
La constante r de la ecuación (G15) está en pulgadas y corresponde al radio del orificio del tornillo, y de la ecuación (G16), el S_{ut} está en Kpsi. El k_t se determinó por medio de la gráfica XXX,

Figura G10

Factores Teóricos de Concentración de Esfuerzos



(a)



(b)

Nota: Tomado de *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9.^a ed., p. 990), por R. G. Budynas y J. K. Nisbett, 2012, McGraw-Hill.

Se selecciona el k_t mayor de las gráficas y se aplica en la ecuación (G14). Posteriormente, se calcula el S'_e y S_e con las ecuaciones (G17 y (G18, respectivamente.

$$S'_e = 0,5 * S_{ut} \quad (G17)$$

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e \quad (G18)$$

Tabla G7

Factores de Fatiga para Cada Sección de la Cuchilla

Secciones	Factor por superficie k_a	Factor por tamaño k_b	Factor por carga k_c	Factor por temperatura k_d	Factor por confiabilidad k_e	k_f	Limite de resistencia a la fatiga [Pa] S_e
1	0,914	0,920	0,85	1	0,753	1,936	1,111E+08
2	0,914	0,920	0,85	1	0,753	1,936	1,111E+08
3	0,914	0,925	0,85	1	0,753	1,936	1,117E+08
4	0,914	0,931	0,85	1	0,753	1,936	1,124E+08
5	0,914	0,937	0,85	1	0,753	1,936	1,133E+08
6	0,914	0,945	0,85	1	0,753	1,936	1,142E+08
7	0,914	0,954	0,85	1	0,753	1,936	1,153E+08
8	0,914	0,966	0,85	1	0,753	1,936	1,167E+08
9	0,914	0,981	0,85	1	0,753	1,936	1,185E+08
10	0,914	1,002	0,85	1	0,753	1,936	1,211E+08
11	0,914	1,040	0,85	1	0,753	1,936	1,257E+08

Posteriormente, se calcularon los esfuerzos medios y alternantes en cada sección mediante las ecuaciones (G19 y G20). El esfuerzo normal máximo corresponde a la suma de los esfuerzos generados por la fuerza axial y el momento flecto, y el esfuerzo normal mínimo que soportará la cuchilla será 0, ya que este valor corresponde al estado cuando no se encuentra en operación de corte. El esfuerzo cortante máximo se obtiene a partir de la carga cortante aplicada, mientras que el esfuerzo cortante mínimo corresponde también a 0.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \text{ ó } \tau_m = \frac{\tau_{m\acute{a}x} + \tau_{m\acute{i}n}}{2} \quad (G19)$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right| \text{ ó } \tau_a = \left| \frac{\tau_{m\acute{a}x} - \tau_{m\acute{i}n}}{2} \right| \quad (G20)$$

Luego, mediante el criterio de Von Misses (ecuación (G21), se determinaron los esfuerzos equivalentes alternantes y medios.

$$\sigma_a' = \sqrt{(k_t * \sigma_a)^2 + 3\tau_a^2} \text{ ó } \sigma_m' = \sqrt{(k_t * \sigma_m)^2 + 3\tau_m^2} \quad (G21)$$

Para el cálculo del factor de seguridad, se utilizó criterio de Goodman Modificado (ecuación (G22)

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (G22)$$

En la Tabla G8 se muestra los valores obtenidos del factor de seguridad para todas las secciones analizadas. De estos, se seleccionó el valor mínimo como referencia para el diseño, dado que representa el punto más crítico.

Tabla G8

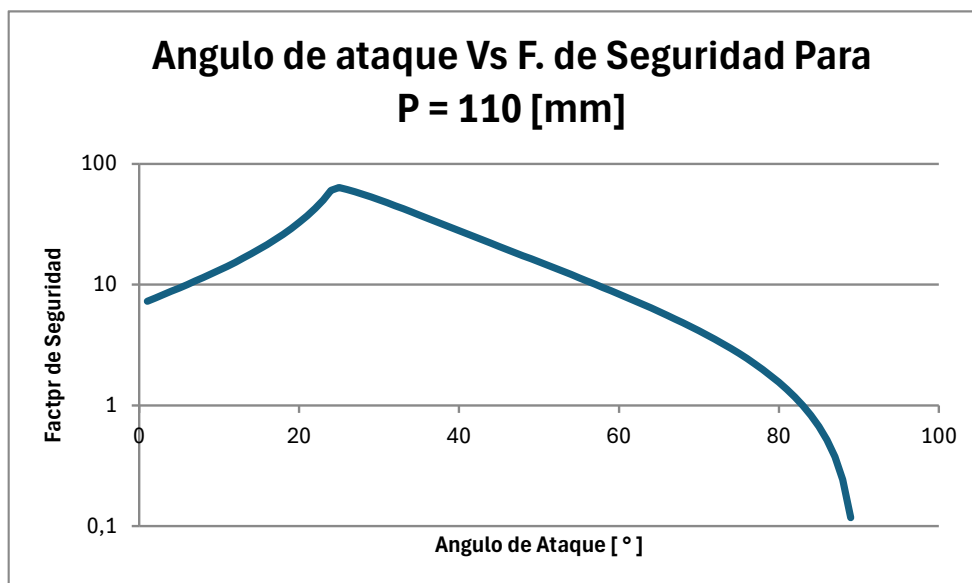
Factor de Seguridad de la Cuchilla

Secciones	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [Pa]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [Pa]	$\sigma_{m\acute{i}n}$ y $\tau_{m\acute{i}n}$ [Pa]	σ_a [Pa]	σ_m [Pa]	τ_m [Pa]	τ_a [Pa]	σ'_a [Pa]	σ'_m [Pa]	N
1	8814296,13	-229183,834	0	4407148,066	4407148,066	-114591,917	114591,9172	8536244,21	8536244,21	10,257
2	3356598,19	-229183,834	0	1678299,094	1678299,094	-114591,917	114591,9172	3255888,86	3255888,86	26,891
3	3729553,54	-254648,705	0	1864776,771	1864776,771	-127324,352	127324,3524	3617654,29	3617654,29	24,310
4	4195747,74	-286479,793	0	2097873,868	2097873,868	-143239,896	143239,8965	4069861,07	4069861,07	21,716
5	4795140,27	-327405,478	0	2397570,134	2397570,134	-163702,739	163702,7388	4651269,8	4651269,8	19,108
6	5594330,31	-381973,057	0	2797165,157	2797165,157	-190986,529	190986,5286	5426481,43	5426481,43	16,485
7	6713196,38	-458367,669	0	3356598,188	3356598,188	-229183,834	229183,8343	6511777,72	6511777,72	13,843
8	8391495,47	-572959,586	0	4195747,735	4195747,735	-286479,793	286479,7929	8139722,15	8139722,15	11,178
9	11188660,6	-763946,114	0	5594330,314	5594330,314	-381973,057	381973,0572	10852962,9	10852962,9	8,484
10	16782990,9	-1145919,17	0	8391495,47	8391495,47	-572959,586	572959,5858	16279444,3	16279444,3	5,752
11	33565981,9	-2291838,34	0	16782990,94	16782990,94	-1145919,17	1145919,172	32558888,6	32558888,6	2,959

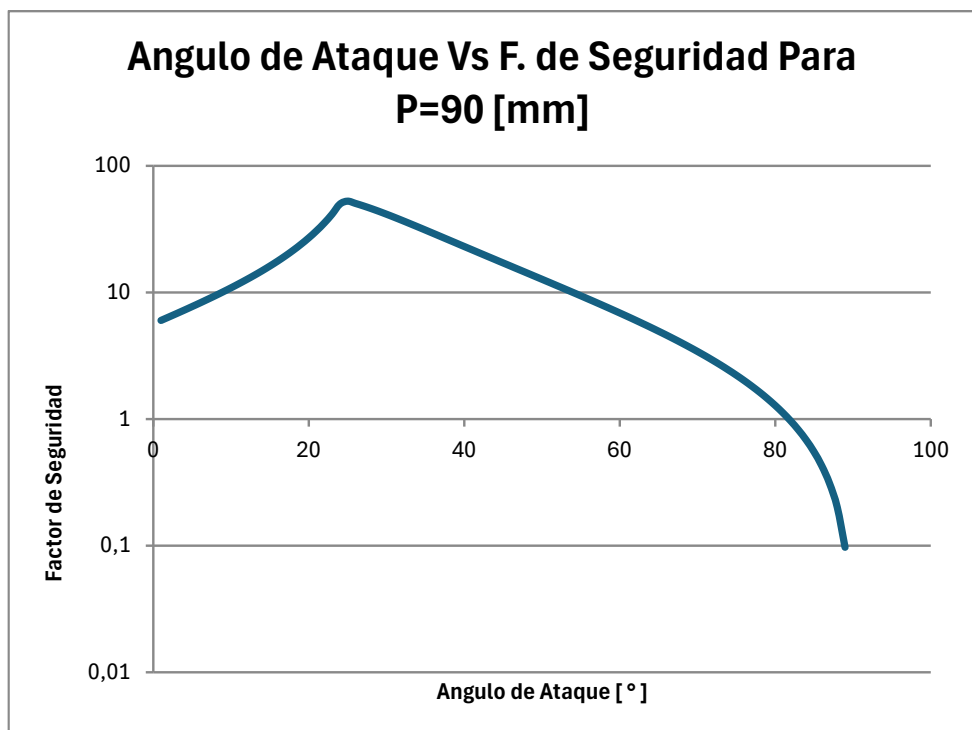
Finalmente, se realizó el mismo procedimiento para $P = 90$ y 110 mm, para todos los ángulos de ataques, dando como resultado lo expuesto en la Figura G11.

Figura G11

Factor de Seguridad de la Cuchilla para $P = 90$ y 110 mm



(a)



(b)

Se observo que, para un ancho de cuchilla de $P = 110$ mm, el factor de seguridad aumenta en comparación con el obtenido para $P = 90$ mm bajo el mismo ángulo de ataque. Si se tiene en cuenta el costo de fabricación de la cuchilla con estas dos medidas, la diferencia es mínima. En consecuencia, se definió:

$$P = 110 \text{ [mm]}$$

$$\alpha = 74 \text{ [}^\circ\text{]}$$