

“Cuando comiences algo, cada día se vuelve más fácil. Pero tienes que hacerlo todos los días y esa es la parte difícil.”

Bojack Horseman



Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA - DCEM

TRABAJO DE TITULACIÓN

**TÍTULO: ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA CORROSION DADA POR LAS DIFERENTES TECNICAS DE
APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO SUPERFICIAL PAVONADO**

ESTUDIANTE PARTICIPANTE: RONNIE ALEJANDRO PADILLA MOSQUERA

DIRECTOR: ING. XAVIER SÁNCHEZ S.

CAPITULO I

GENERALIDADES

Justificación e Importancia

Existen pocos estudios acerca de los beneficios y propiedades adicionales que el pavonado brinda a las piezas mecanizadas de acero. La mayoría de investigaciones existentes se centran en los resultados de homogeneidad de la capa de óxido de pavonado y no en el proceso como tal o en la cuantificación de la resistencia a la corrosión.

Es por esto que la presente investigación tiene como finalidad analizar la resistencia a la corrosión, cambios en la dureza superficial y rugosidad del acero cuando se le aplica los dos métodos de tratamiento superficial del pavonado, y establecer un proceso adecuado en base a los diferentes resultados que se requieran obtener.

Objetivo General

Estudiar la resistencia a la corrosión adquirida por el acero de las diferentes técnicas de aplicación del tratamiento superficial pavonado

Objetivos específicos

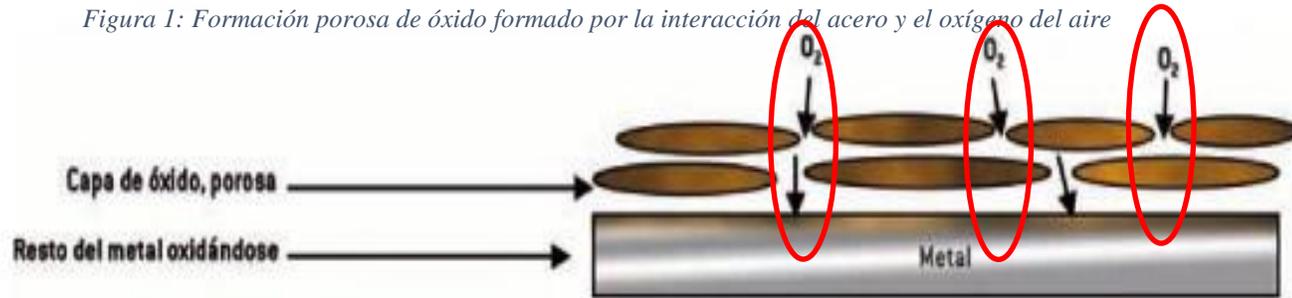
1. Analizar los resultados de anti corrosión de los dos tipos de procesos de aplicación del tratamiento superficial pavonado en función de sus variables de control y en la sumersión de diferentes bases (soluciones químicas y aceites) para un solo tipo de acero, y posteriormente compararlos entre sí.
2. Establecer una metodología para estudiar la corrosión de los aceros y poder cuantificar la información.
3. Analizar el estado de la dureza superficial y rugosidad en las probetas de acero antes y después de la aplicación del tratamiento superficial pavonado y determinar diferencias de aumento o decrecimiento.
4. Establecer un proceso adecuado y técnico para la correcta ejecución del proceso del tratamiento superficial pavonado, en función del resultado deseado.

CAPITULO II

CONCEPTOS

Corrosión

Figura 1: Formación porosa de óxido formado por la interacción del acero y el oxígeno del aire



Nota: Esta es la formación natural del óxido en cualquier tipo de acero que no tenga en su composición un componente antioxidante. Fuente: (Morales et al., 2013)

La corrosión es un término utilizado para definir la reacción química o electroquímica entre 2 materiales, generalmente metales y el ambiente

Pavonado

El pavonado es un tratamiento superficial del tipo revestido o de deposición que se aplica al acero para evitar la corrosión y disminuir el riesgo de propagación

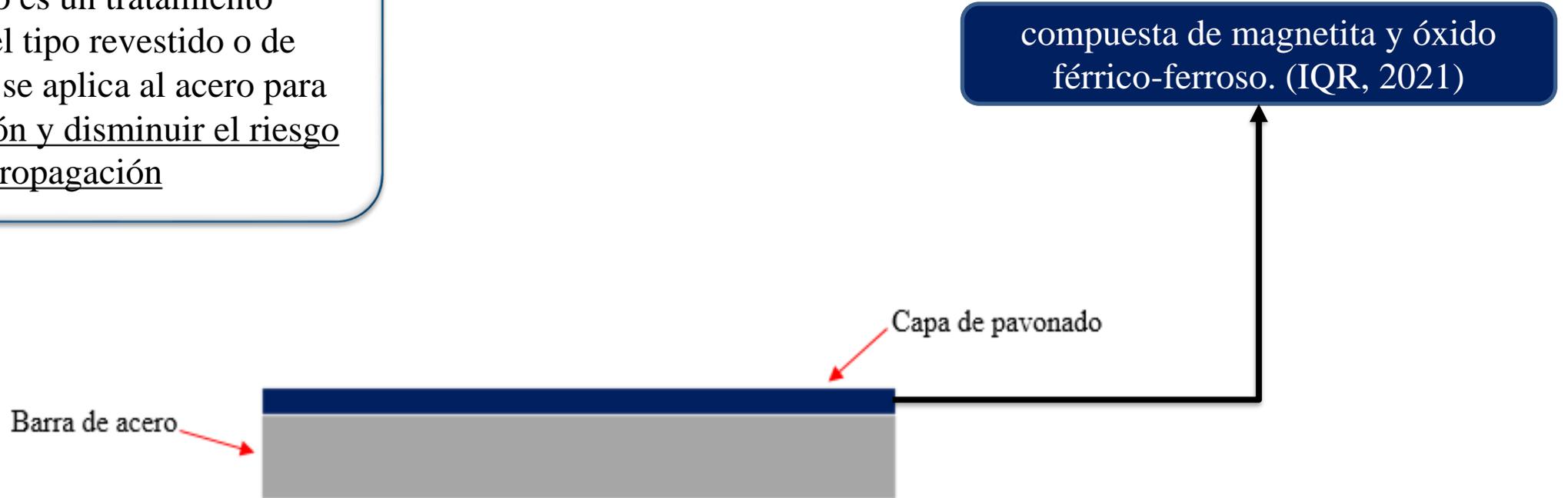


Figura 2: Representación de la capa de óxido formada por el pavonado

Pavonado Térmico

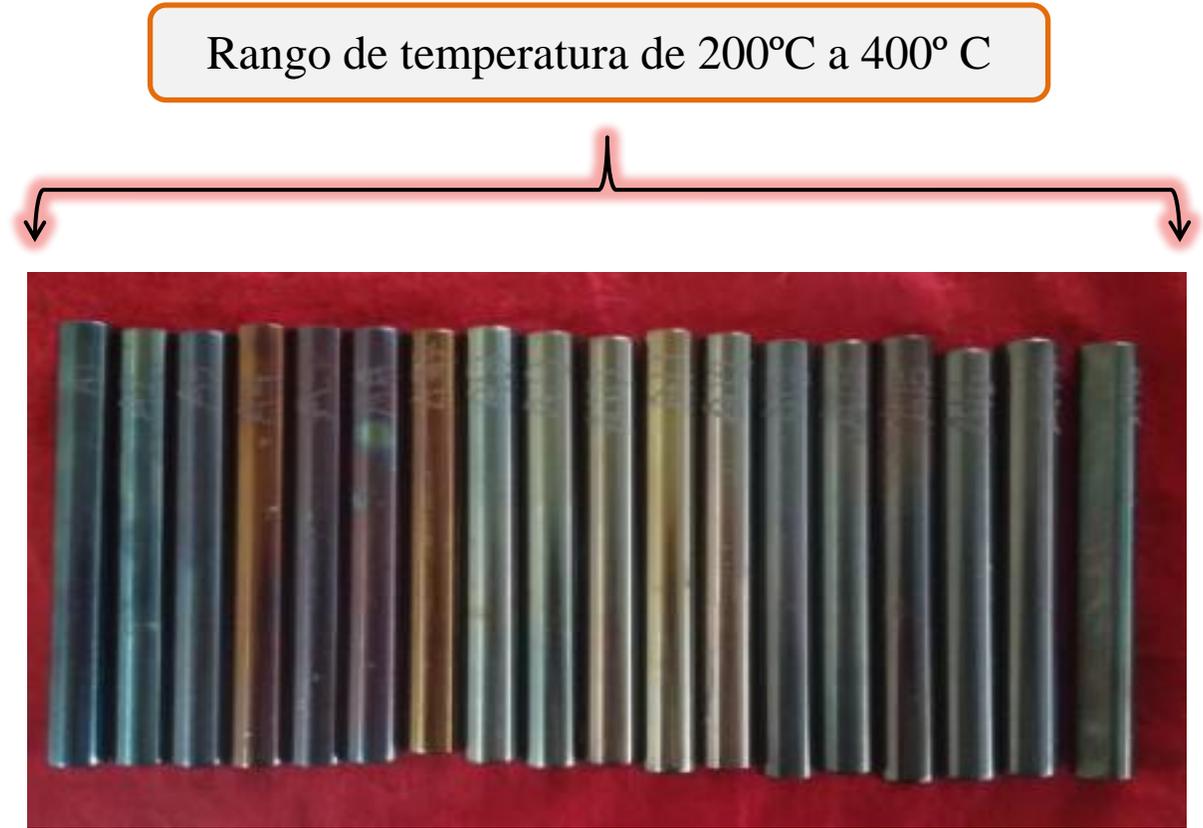
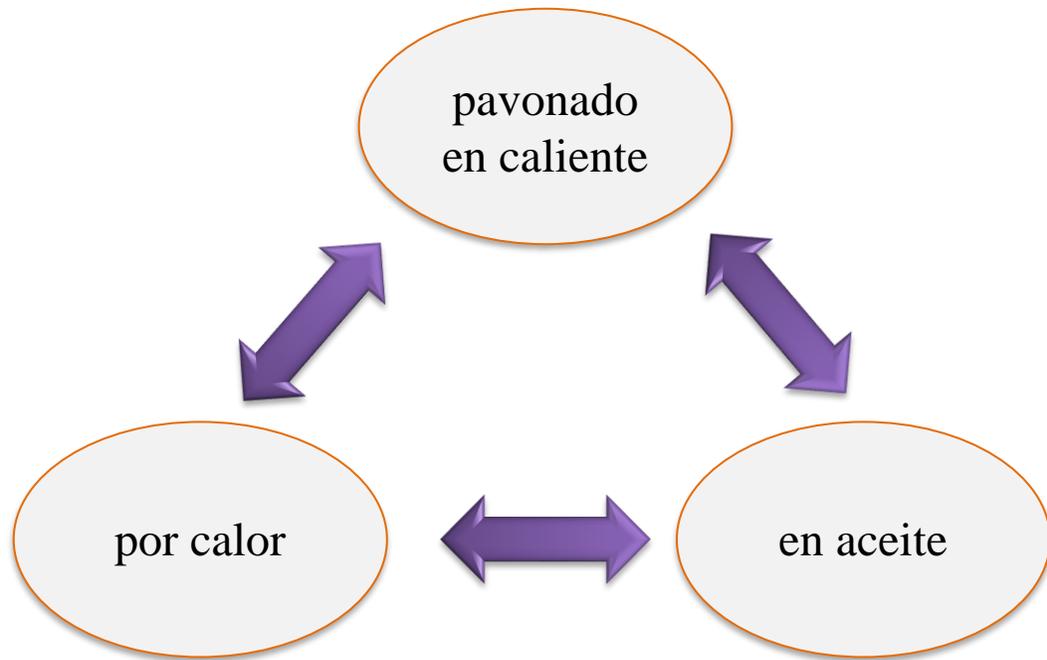


Figura 3: Distintas tonalidades del acero obtenidas mediante el proceso de pavonado térmico con distintas temperaturas y aceites

Pavonado Químico



Figura 4: Distintas tonalidades de tono oscuro del acero obtenidas mediante el proceso de pavonado químico con distintos tiempos de sumersión y cantidad de agente químico

Los agentes químicos que más se utilizan en el agente oxidante son:

- Hidróxido de Sodio ($NaOH$)
- Nitrato de Sodio (NO_3Na)
- Nitrato de Potasio (NO_3K)

Ensayos de Corrosión Acelerada

Ensayo de inmersión Alternada y norma INEN 1190

Tiempo de secado: 50 min

Tiempo de inmersión: 10 min

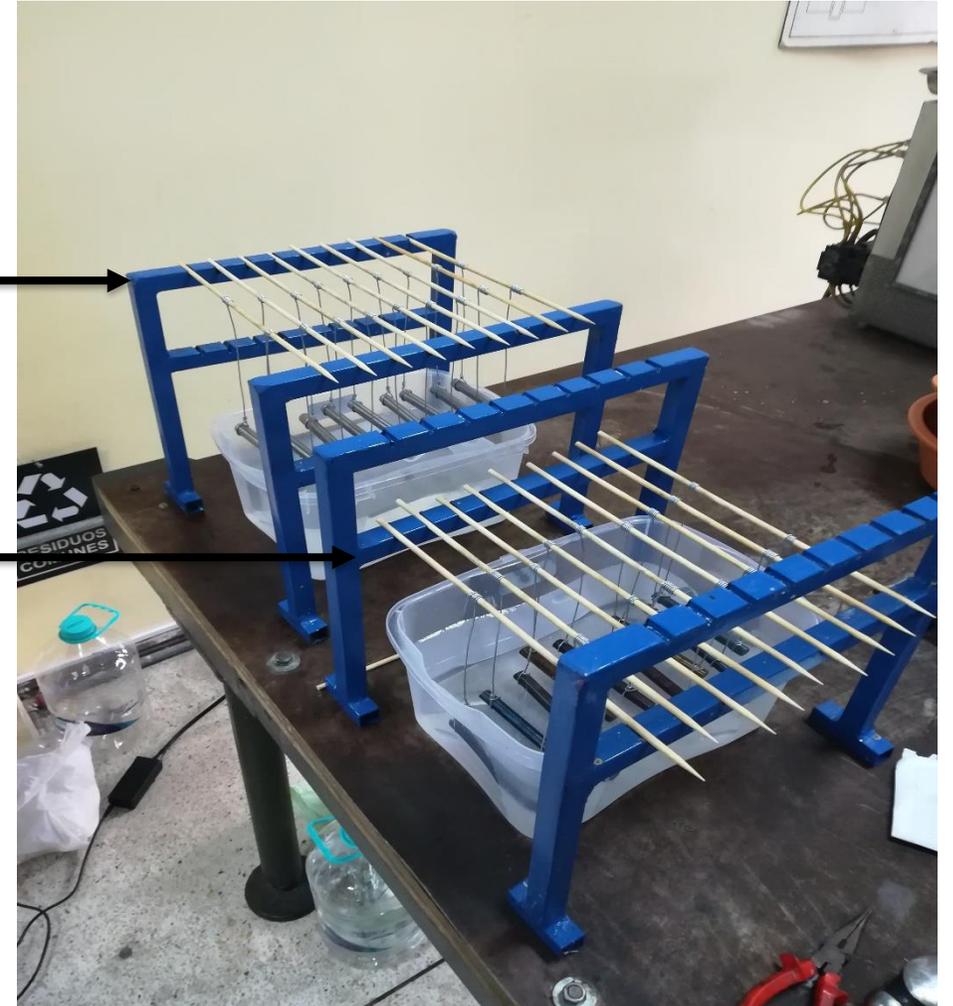


Figura 5: Ensayo de inmersión alternada

Norma INEN 1176

La norma INEN 1176 es la que va a la par con la norma 1190

Tabla de frecuencias		
0	0,1	10
0,1	0,25	9
0,25	0,5	8
0,5	1	7
1	2	6
2	4	5
4	8	4
8	16	3
16	32	2
32	64	1
64	101	0

Tabla 1: Frecuencias e índices que categorizan a la cantidad de oxidación presente en las piezas de metal según INEN

$$Frecuencia = 100 * \frac{n}{N} \quad (1)$$

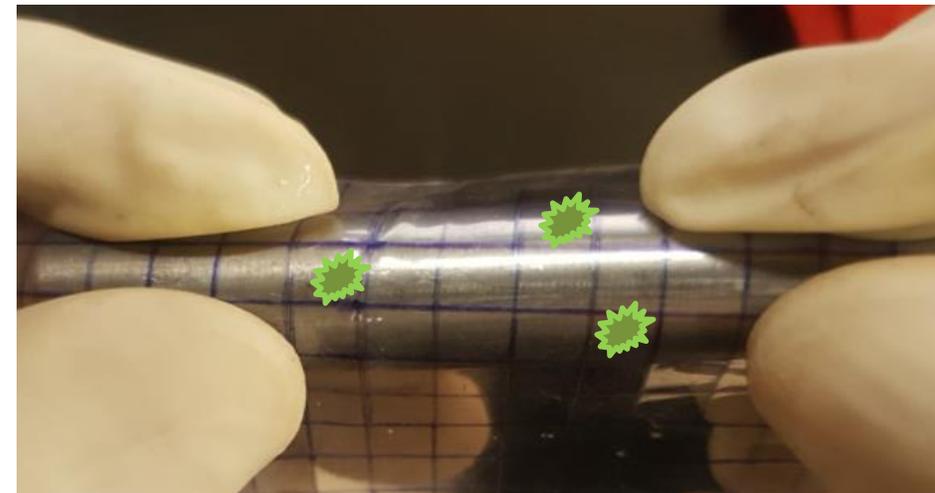
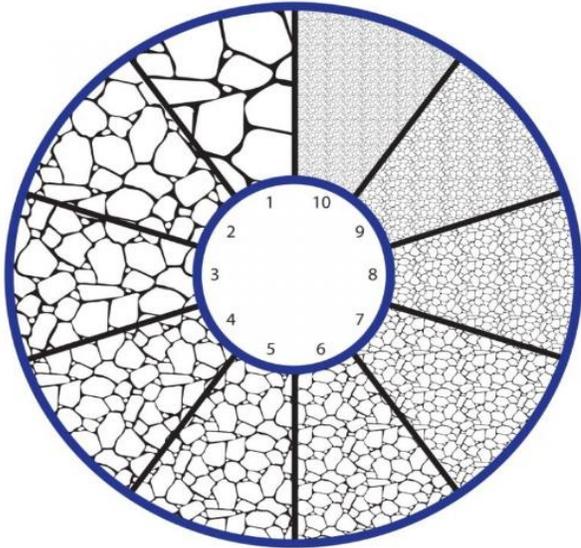


Figura 6: Conteo de las manchas de corrosión en una probeta sin pavonar

Resultados a analizar-propiedades mecánicas

Tamaño de Grano

Figura 7: Diferentes tamaños de grano catalogados según la ASTM



Nota: Representación resumida del índice del tamaño de grano de la ASTM, obtenido de (Levinson, 2020)

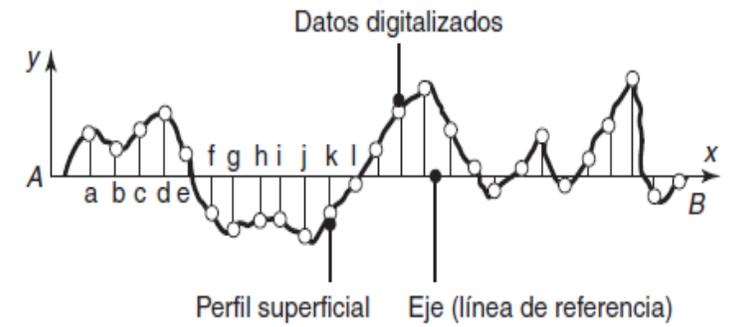
Dureza

Figura 8: Calibración del durómetro con el patrón HBR 88



Rugosidad

Figura 9: Topografía de una superficie de un material aleatorio



Nota: figura extraída de (Kalpakjian & Schmid, 2008)

CAPITULO III

METODOLOGIA

Diseño del experimento y selección de variables

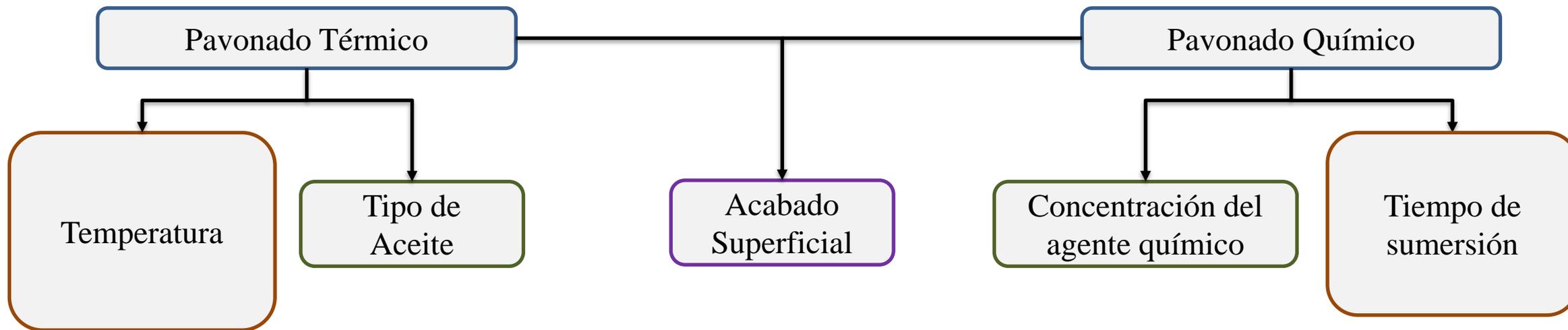


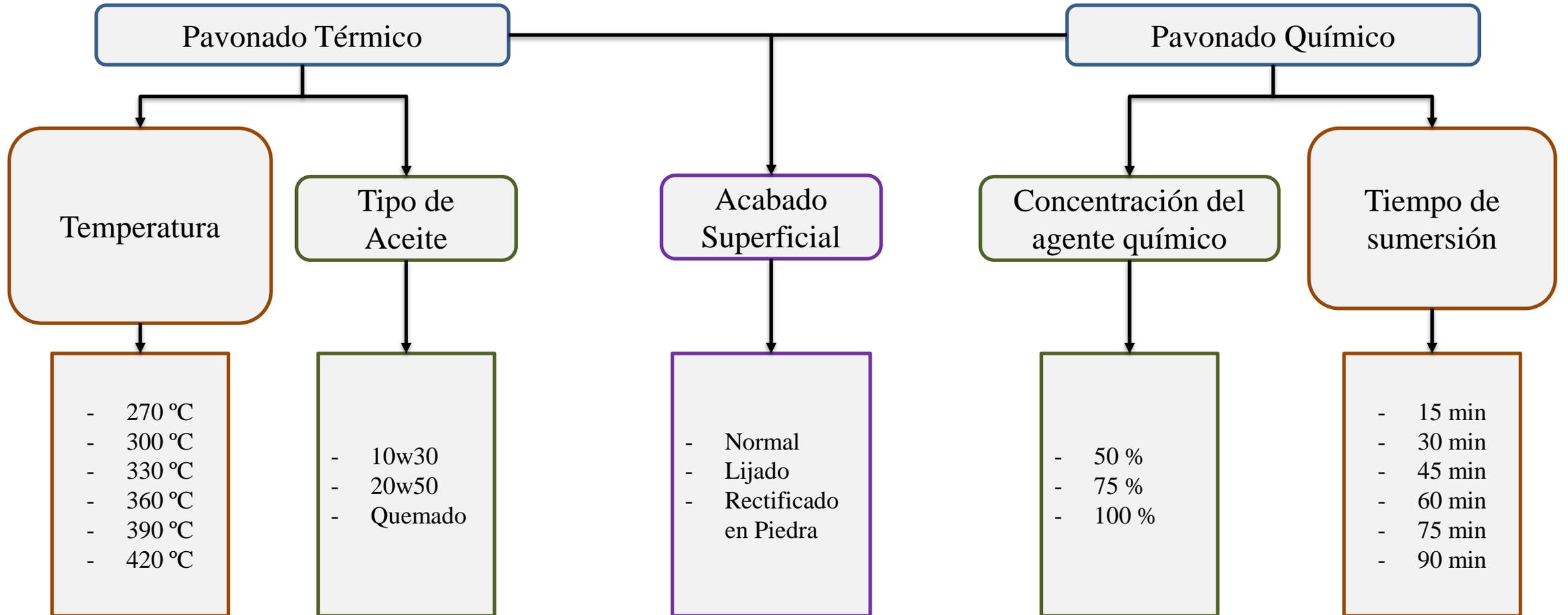
Figura 10: Matriz ortogonal genérica

a) Arreglo interior

Corrida	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Nota: Figura extraída de(Montgomery, 2003)

Selección de parámetros para el pavonado



Combinaciones de factores para los procesos de pavonado

Tabla 2: Combinaciones necesarias de ensayos para el análisis del pavonado térmico

#	Temperatura (°C)	Aceite	Superficie	Código
1	270	10W30	Lijado	A1
2	270	20W50	Piedra	A2
3	270	Quemado	Normal	A3
4	300	10W30	Lijado	A4
5	300	20W50	Piedra	A5
6	300	Quemado	Normal	A6
7	330	10W30	Piedra	A7
8	330	20W50	Normal	A8
9	330	Quemado	Lijado	A9
10	360	10W30	Normal	A10
11	360	20W50	Lijado	A11
12	360	Quemado	Piedra	A12
13	390	10W30	Piedra	A13
14	390	20W50	Normal	A14
15	390	Quemado	Lijado	A15
16	420	10W30	Normal	A16
17	420	20W50	Lijado	A17
18	420	Quemado	Piedra	A18

x3

Tabla 3: Combinaciones necesarias de ensayos para el análisis del pavonado químico

#	Tiempo (min)	Químico	Superficie	Código
1	15	PB 100%	Lijado	Q1
2	15	PB 75%	Piedra	Q2
3	15	PB 50%	Normal	Q3
4	30	PB 100%	Lijado	Q4
5	30	PB 75%	Piedra	Q5
6	30	PB 50%	Normal	Q6
7	45	PB 100%	Piedra	Q7
8	45	PB 75%	Normal	Q8
9	45	PB 50%	Lijado	Q9
10	60	PB 100%	Normal	Q10
11	60	PB 75%	Lijado	Q11
12	60	PB 50%	Piedra	Q12
13	75	PB 100%	Piedra	Q13
14	75	PB 75%	Normal	Q14
15	75	PB 50%	Lijado	Q15
16	90	PB 100%	Normal	Q16
17	90	PB 75%	Lijado	Q17
18	90	PB 50%	Piedra	Q18

Preparación de las probetas

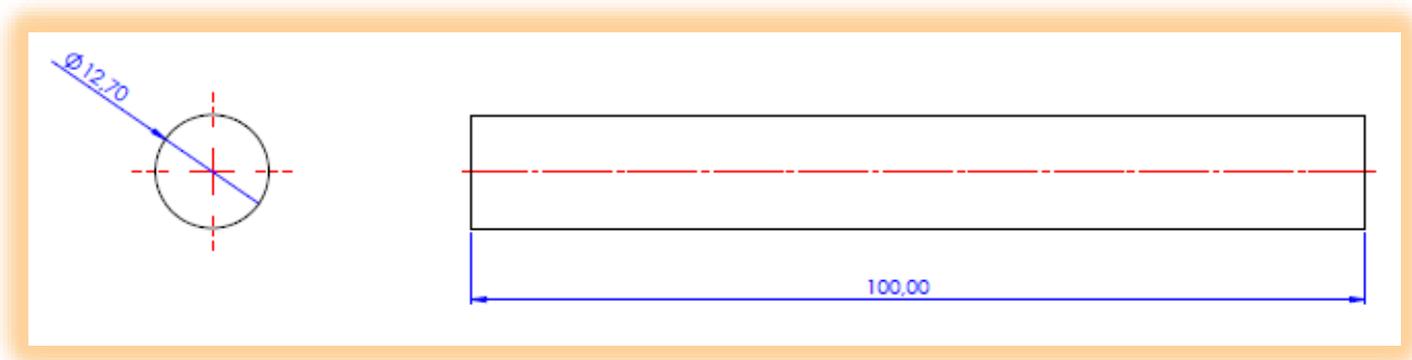


Figura 11: Dimensiones de las probetas a utilizar

El material a utilizar es el
acero AISI 1018

Preparación de las probetas

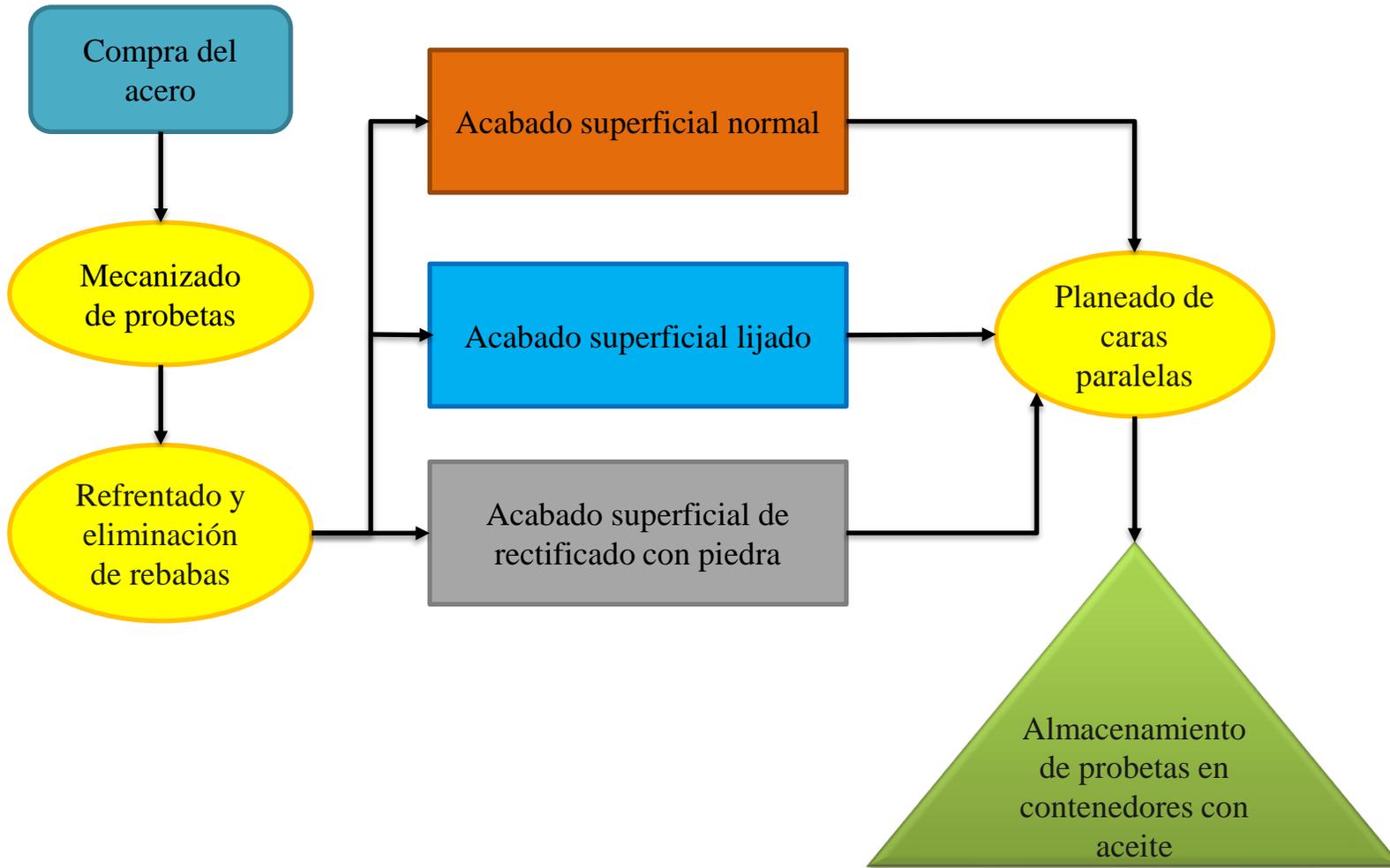


Figura 12: Proceso de mecanizado y almacenamiento



Figura 13: Máquinas herramientas utilizadas para el mecanizado de las probetas



Figura 14: Probetas de ensayo con acabado superficial tipo pulido dado por lija y piedra de rectificar

Limpieza

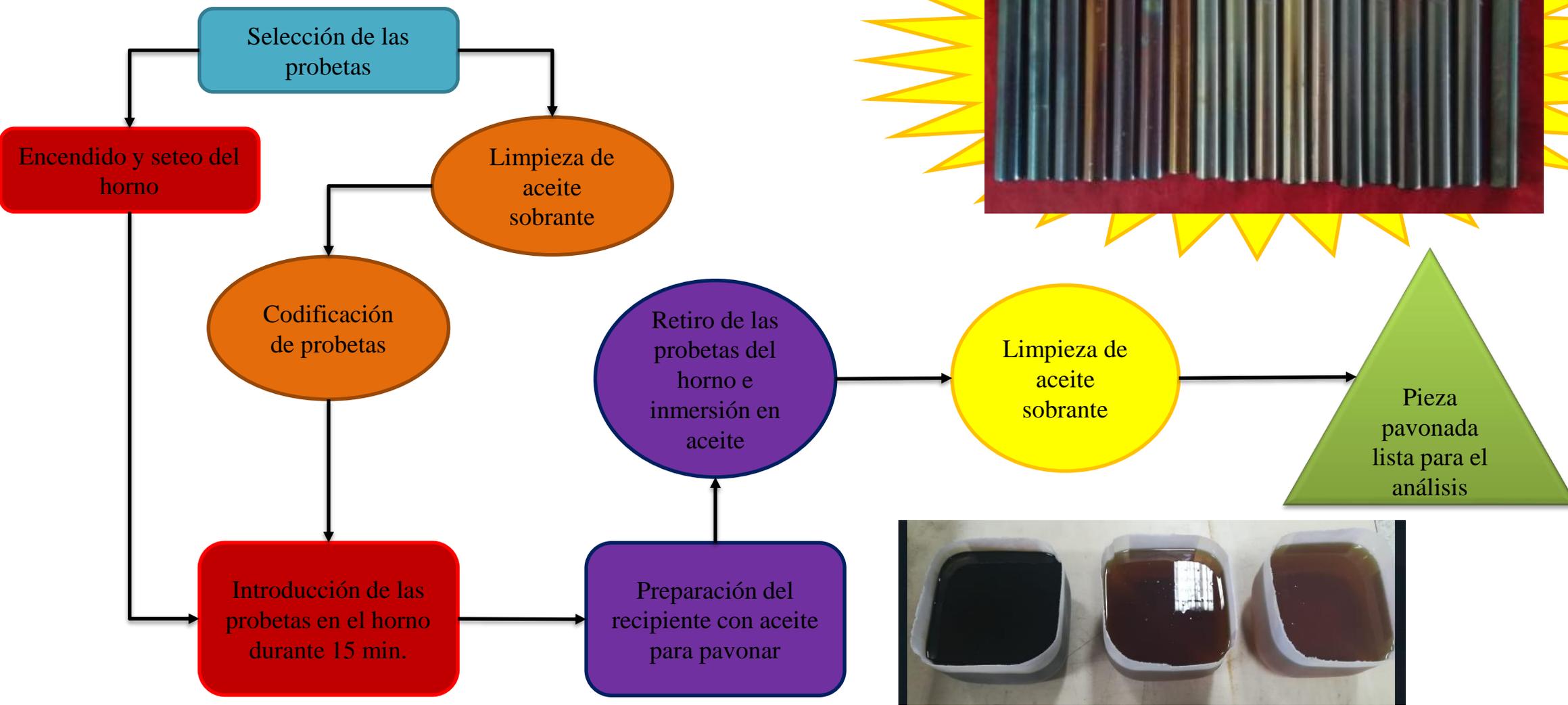


Figura 15: Útiles de limpieza para las probetas



Figura 16: Probetas con acabado superficial del tipo "lijado" almacenadas en aceite 20w-50

Proceso del pavonado térmico



Proceso del pavonado químico



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Ensayo de Dureza



Figura 17: Durómetro Rams Rockford

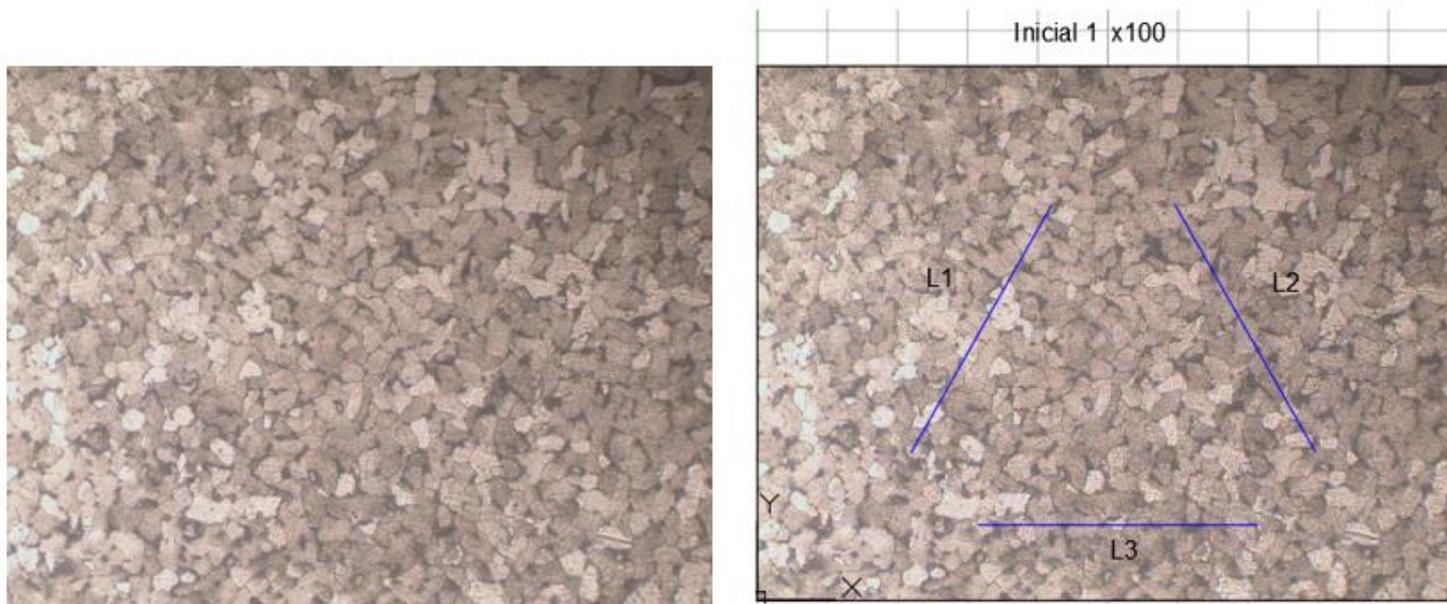


Figura 18: Calibración del durómetro con el patrón HBR 88

Tabla 4: Valores de dureza inicial del acero analizado

Acero inicial	HBR			Promedio
	c	i	d	
	86	88	88	87,3333

Micrografía



Las probetas analizadas
fueron: A15 y A17

Figura 19: Análisis del tamaño de grano por el método de intersección

Medición de la rugosidad



Figura 20: Perfilómetro Bruker, modelo Dektak XT, usado para medir la rugosidad en las probetas pavonadas



Figura 21: Probeta preparada para analizar rugosidad

Tabla 5: Valores de rugosidad inicial del acero analizado

Rugosidad inicial	a	b	c	Ra (nm)
Lijado	230	300	350	297,433
Piedra	190	250	220	221,359
Normal	820	460	730	687,241

Nota: s significa sumersión

Resistencia a la corrosión



Figura 22: Elementos principales de la solución salina

Para crear la solución se usó SAL MARINA (100% NaCl) y AGUA EMBOTELLADA

La mezcla utilizada fue de 3.5 litros de agua y 127 gramos de sal

Resistencia a la corrosión



Figura 23: Zona de trabajo de la prueba de resistencia a la corrosión

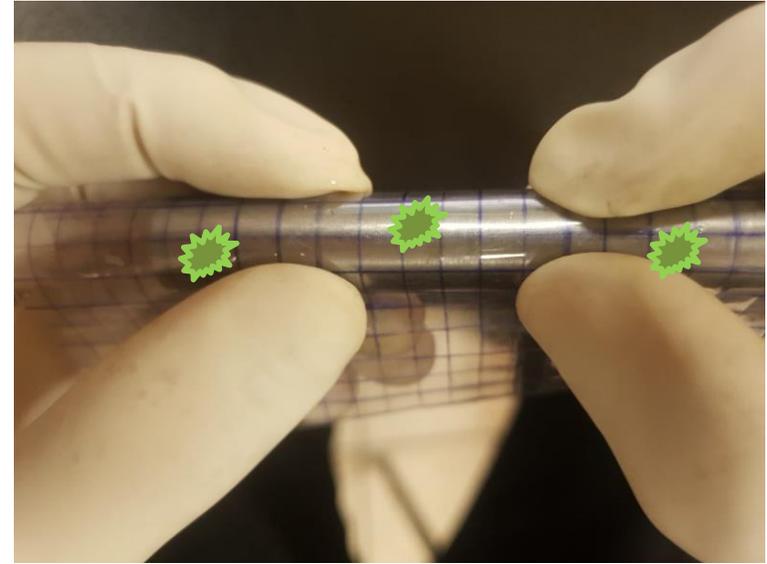


Figura 24: Conteo de las manchas de corrosión en una probeta sin pavonar

Tabla 6: Valores de corrosión inicial del acero analizado

Corrosión inicial	Promedios			Valor Tabulado		
	s1	s2	s3	s1	s2	s3
Lijado	27,00	56,33	63,00	3	2	2
Piedra	15,67	35,33	45,33	4	3	3
Normal	13,33	21,33	33,00	4	4	3

CAPITULO IV

ANALISIS DE DATOS



Coloración del pavonado térmico y químico

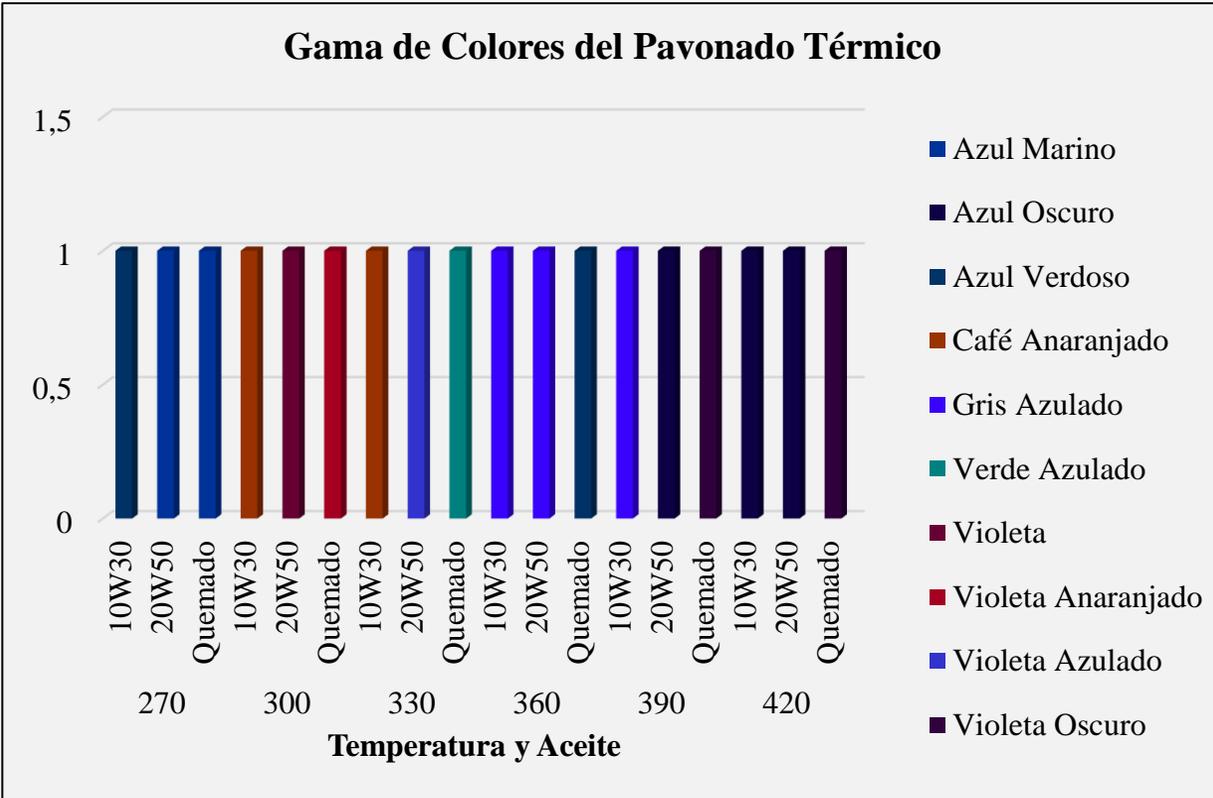


Figura 25: Representación gráfica de los colores obtenidos en el proceso de pavonado térmico

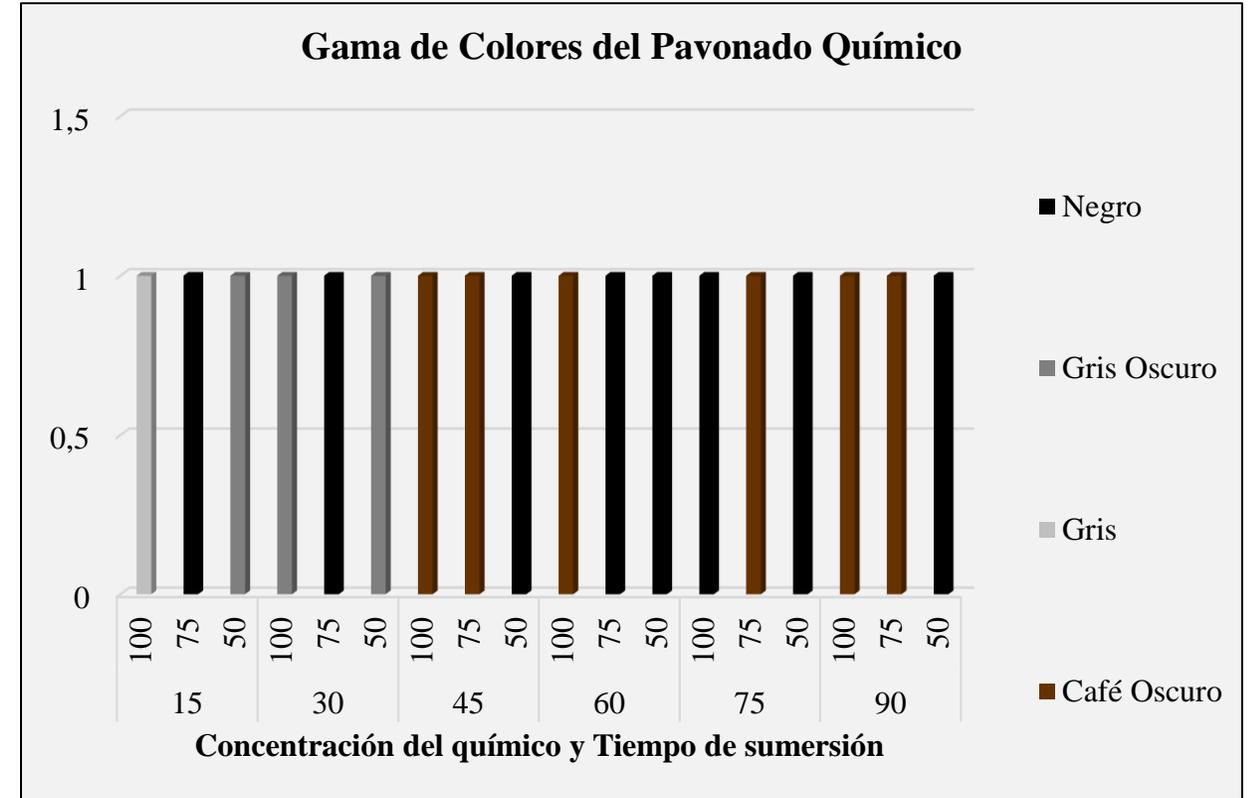


Figura 26: Representación gráfica de los colores obtenidos en el proceso de pavonado químico

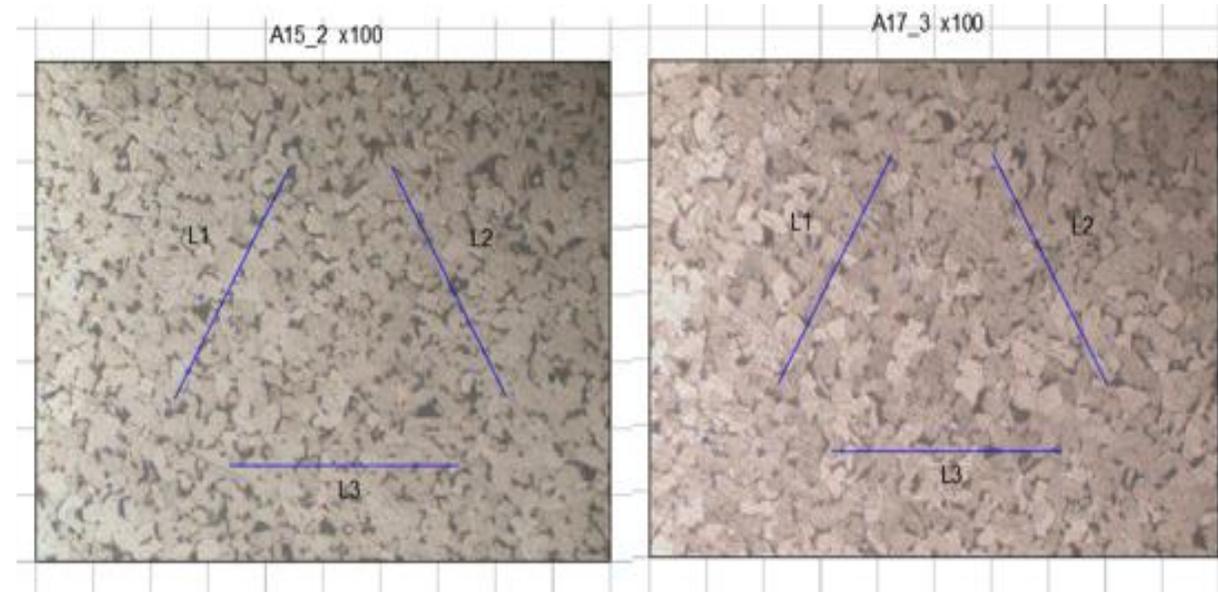
Resultados de la Micrografía

El análisis de la microestructura se lo realizó en 3 tipos de probetas: acero inicial, pavonado a 390 °C y pavonado a 420° C para determinar si existía algún cambio en el tamaño de grano

Tabla 7: Datos obtenidos del análisis del tamaño de grano para 2 probetas del pavonado térmico

Micrografía	g1	g2	g3	Ni	NL	G	Promedio	% Variación
Inicial	15	14	13	42	35,000	6,971	6,922	0
	14	12	13	39	32,500	6,757		
	14	14	15	43	35,833	7,038		
A15	12	14	13	39	32,500	6,757	6,730	-2,766
	15	15	10	40	33,333	6,830		
	14	12	11	37	30,833	6,605		
A17	14	13	13	40	33,333	6,830	6,705	-3,127
	13	13	11	37	30,833	6,605		
	12	13	13	38	31,667	6,682		
Ampliación	100							

Figura 27: Micrografía de las probetas A15 y A17 después de ser aplicadas el pavonado térmico



Resultados del ensayo de Dureza

Dureza del pavonado térmico

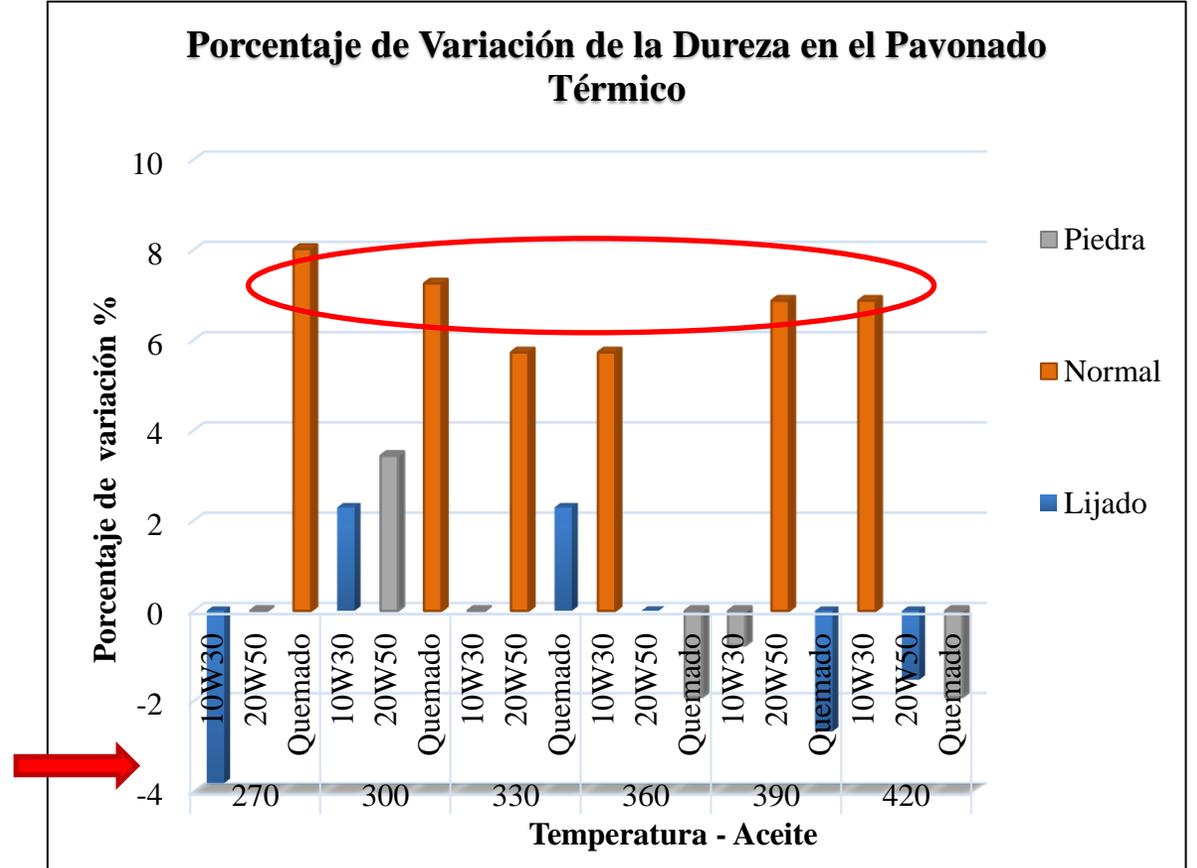
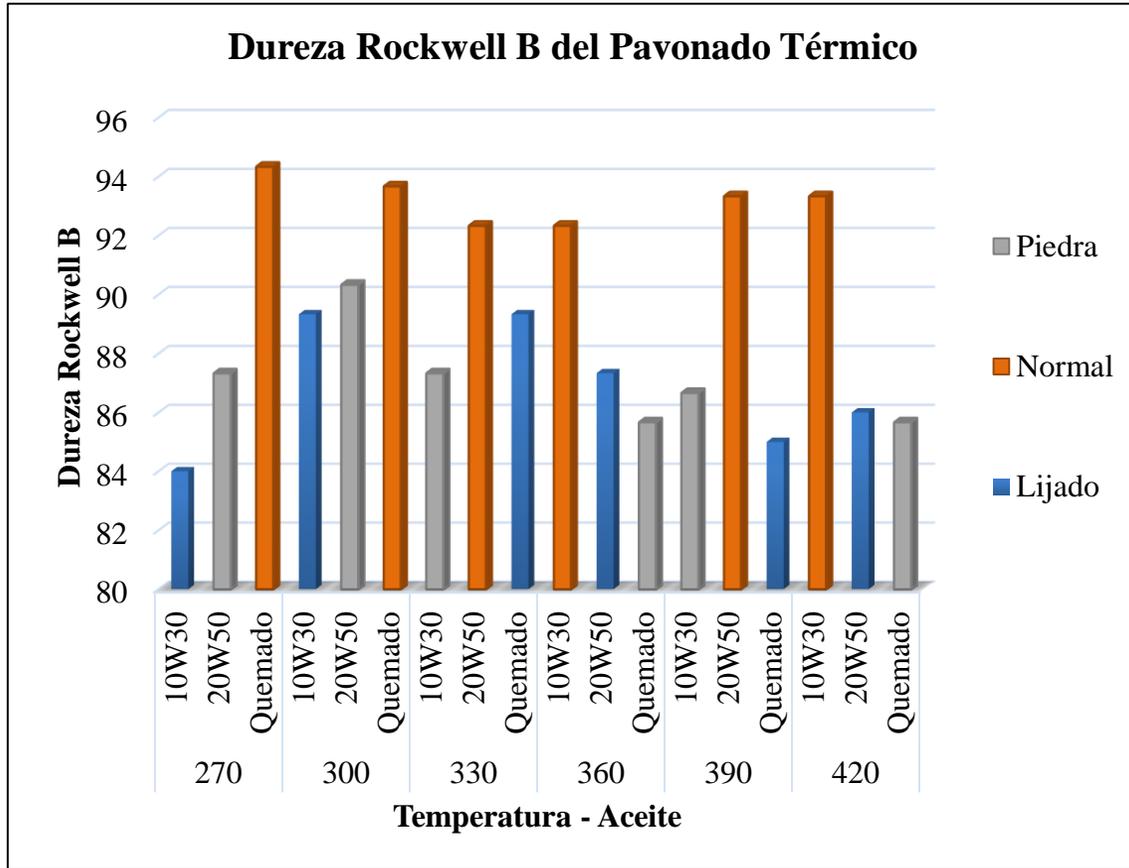


Figura 28: Comportamiento de la dureza superficial de las probetas después de ser aplicado el pavonado térmico

Figura 29: Crecimiento y decrecimiento de la dureza en el pavonado térmico

Resultados del ensayo de Dureza - pavonado térmico

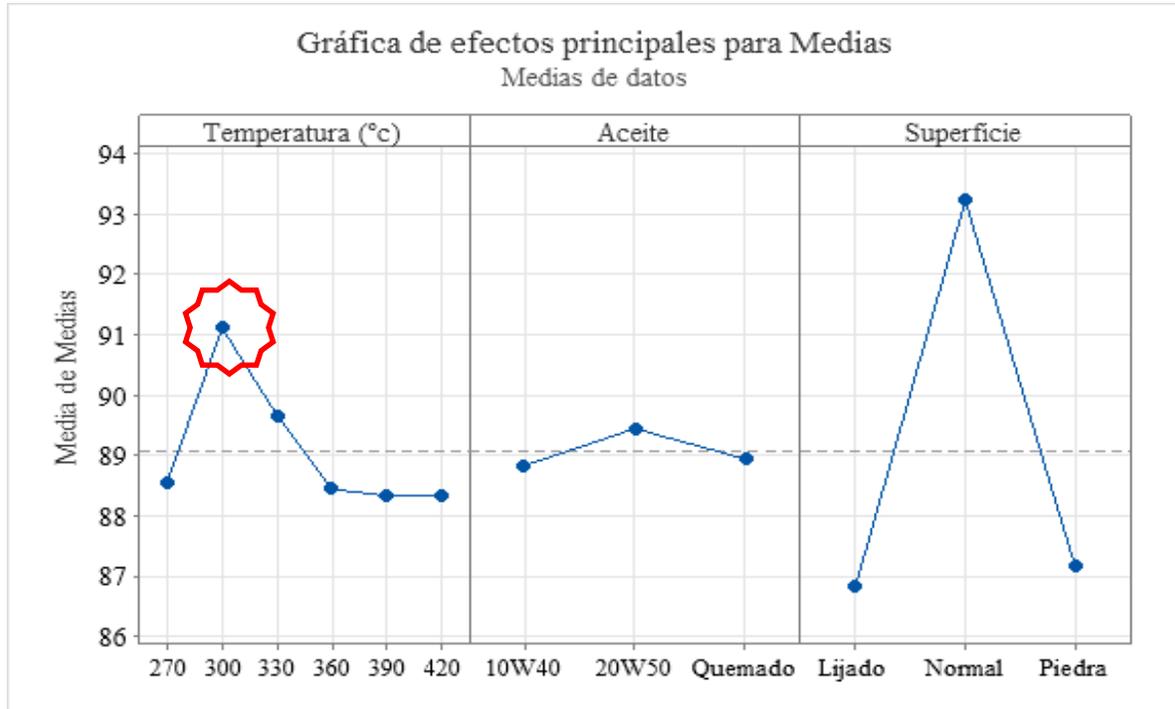


Figura 30: Comportamiento de la dureza en el acero según los factores del pavonado térmico por separado

Tabla 8: Agrupación del factor temperatura según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con respuesta de dureza

Temperatura (°C)	N	Media	Agrupación
300	3	91,11	A
330	3	89,67	A
270	3	88,56	A
360	3	88,44	A
420	3	88,33	A
390	3	88,33	A

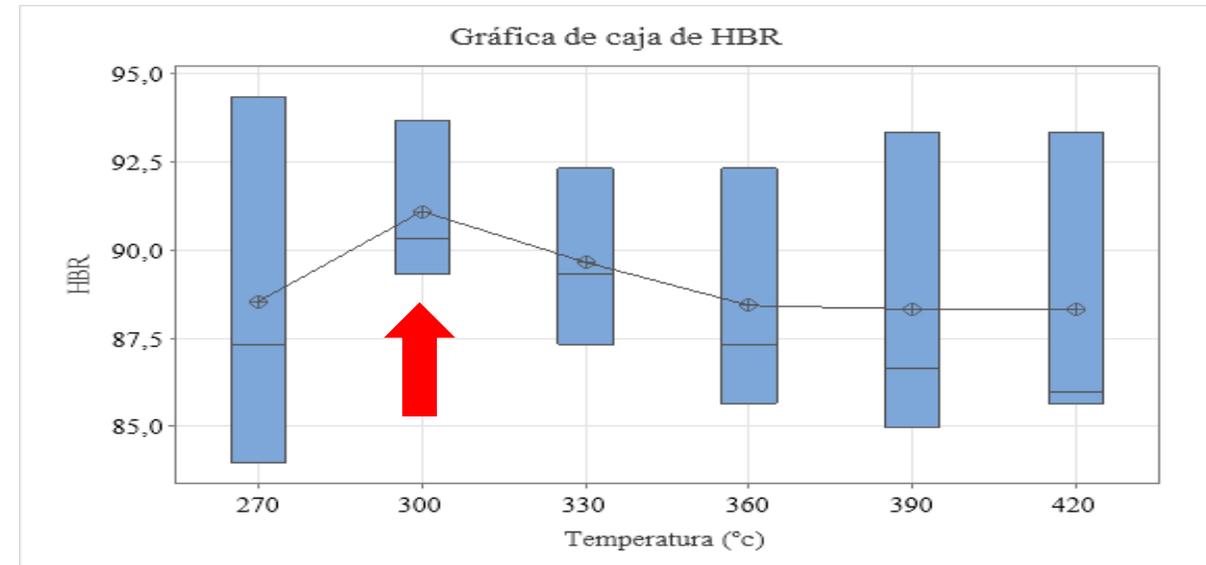


Figura 31: Representación de caja de la dureza en el pavonado térmico en relación a la temperatura

Resultados del ensayo de Dureza - pavonado térmico

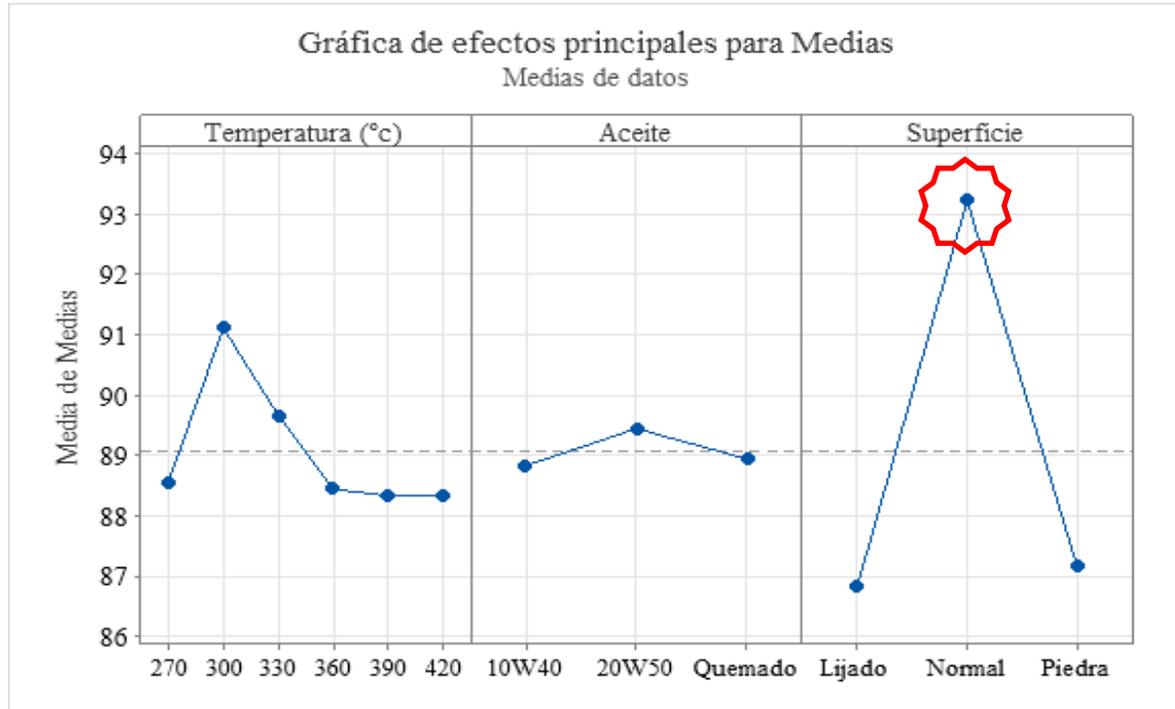


Figura 30: Comportamiento de la dureza en el acero según los factores del pavonado térmico por separado

Tabla 9: Agrupación del factor superficie según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con respuesta de dureza

Superficie	N	Media	Agrupación
Normal	6	93,222	A
Piedra	6	87,167	B
Lijado	6	86,833	B

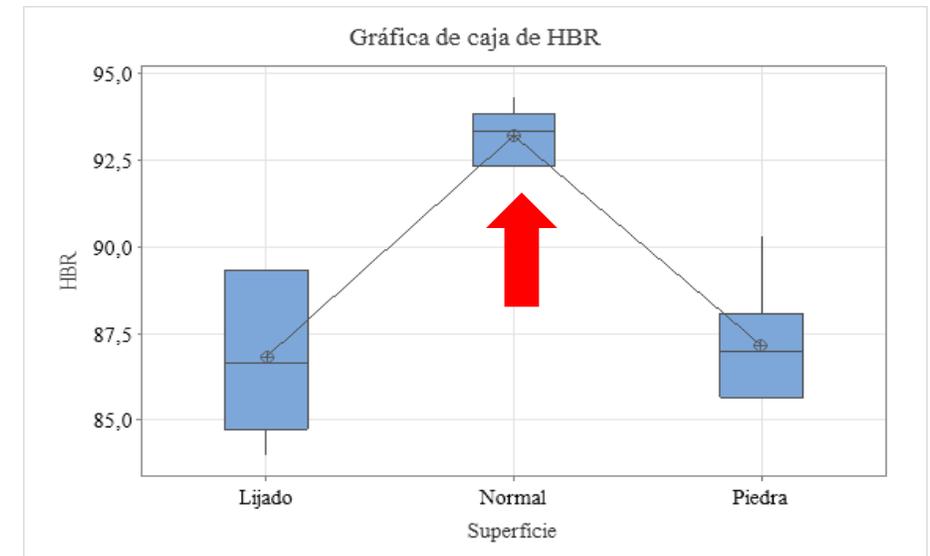


Figura 32: Representación de caja de la dureza en el pavonado térmico en relación a la temperatura

Resultados del ensayo de Dureza - pavonado térmico

Gráfica de interacción para HBR
Medias de datos

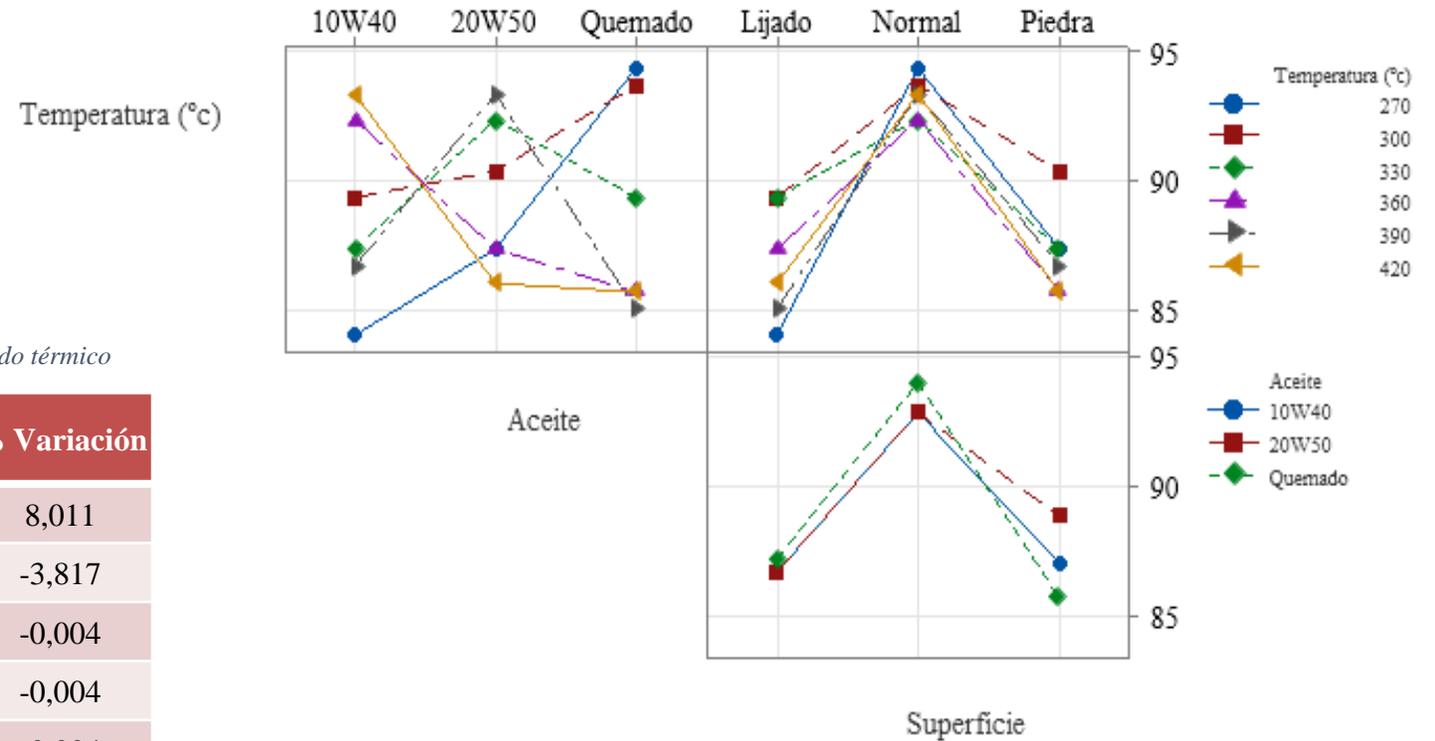


Tabla 10: Datos más significativos de la interacción entre factores del pavonado térmico

	Temperatura (°C)	Aceite	Superficie	HBR	% Variación
Max	270	Quemado	Normal	94,330	8,011
Min	270	10w30	Lijado	84,000	-3,817
Cercano al V.I.	270	20w50	Piedra	87,330	-0,004
	330	10w30	Piedra	87,330	-0,004
	360	20w50	Lijado	87,330	-0,004

Figura 33: Interacción de factores del pavonado térmico con resultados de dureza

Resultados del ensayo de Dureza

Dureza del pavonado químico

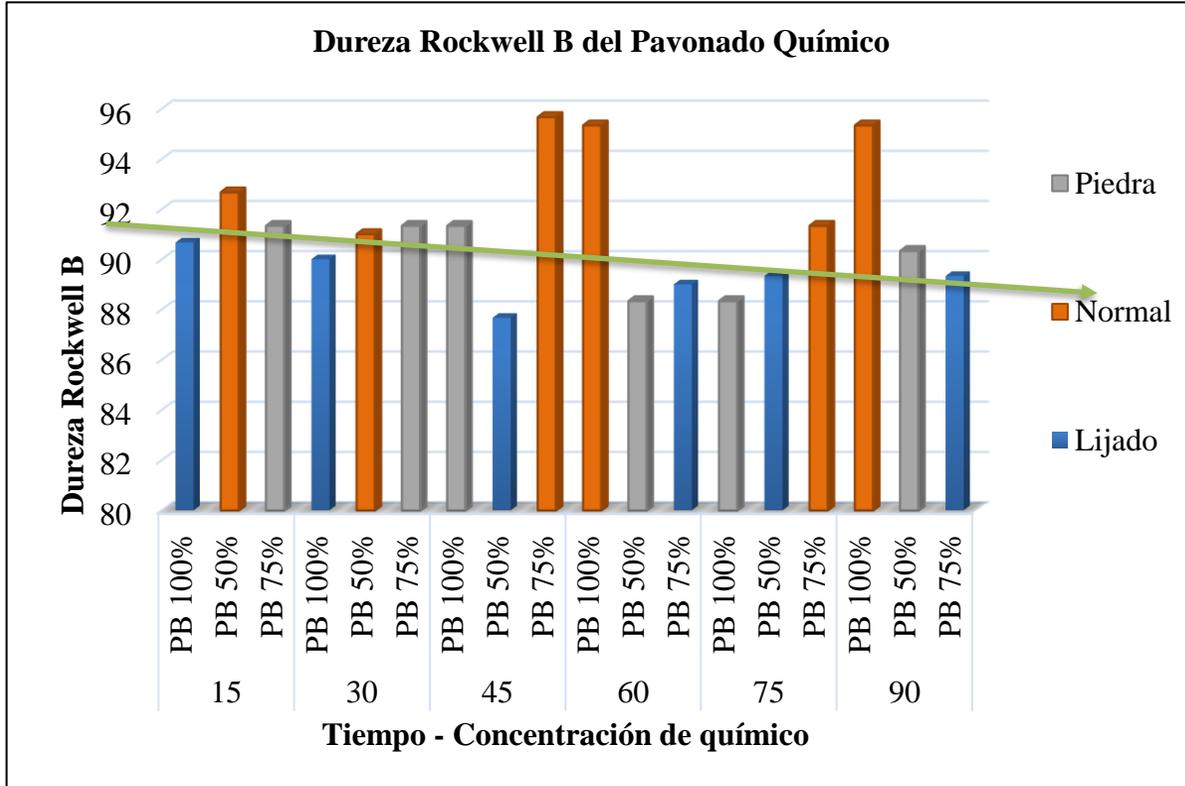


Figura 34: Comportamiento de la dureza superficial de las probetas después de ser aplicado el pavonado químico

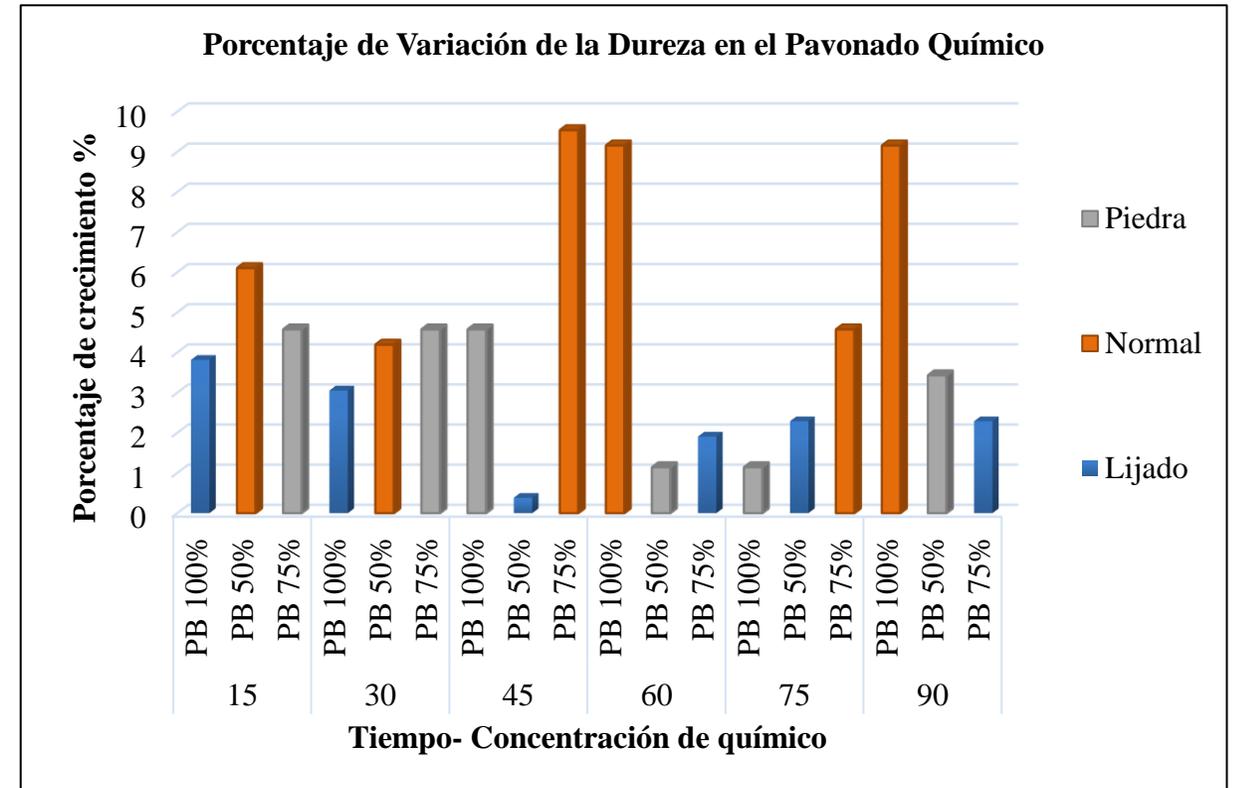


Figura 35: Crecimiento de la dureza en el pavonado químico

Resultados del ensayo de Dureza - pavonado químico

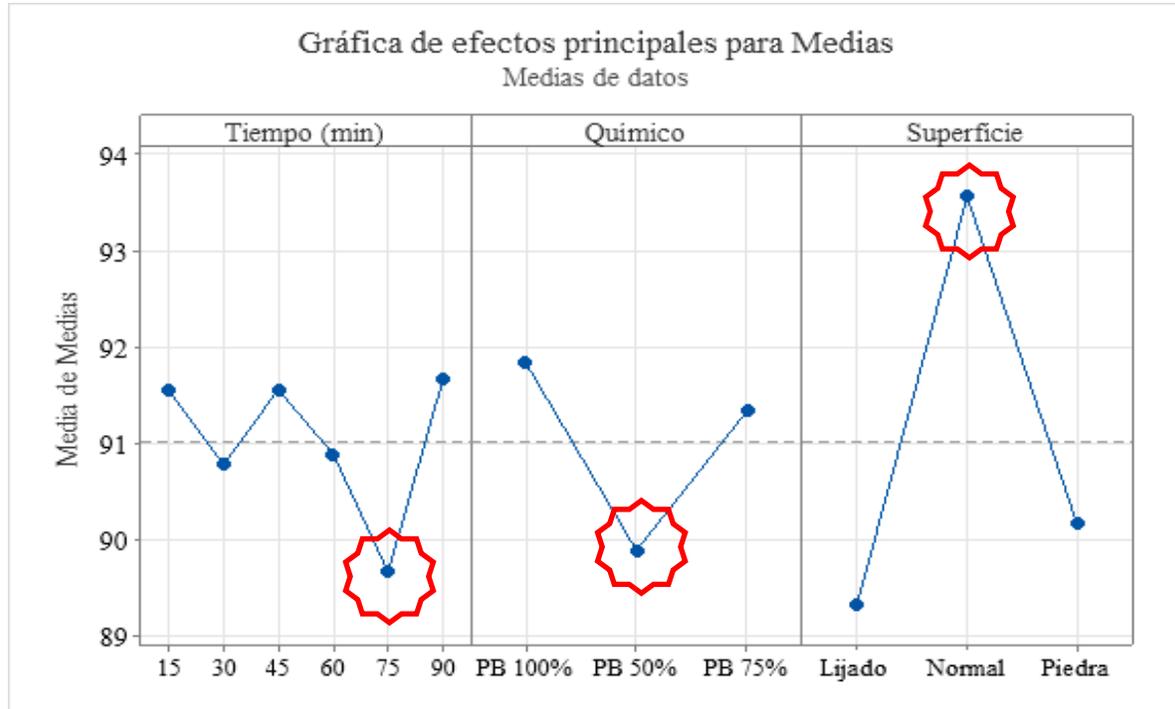


Figura 36: Comportamiento de la dureza en el acero según los factores del pavonado térmico por separado

Tabla 11: Agrupación del factor tiempo según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con resultado de dureza

Tiempo (min)	N	Media	Agrupación
90	3	91,67	A
45	3	91,56	A
15	3	91,556	A
60	3	90,89	A
30	3	90,778	A
75	3	89,667	A

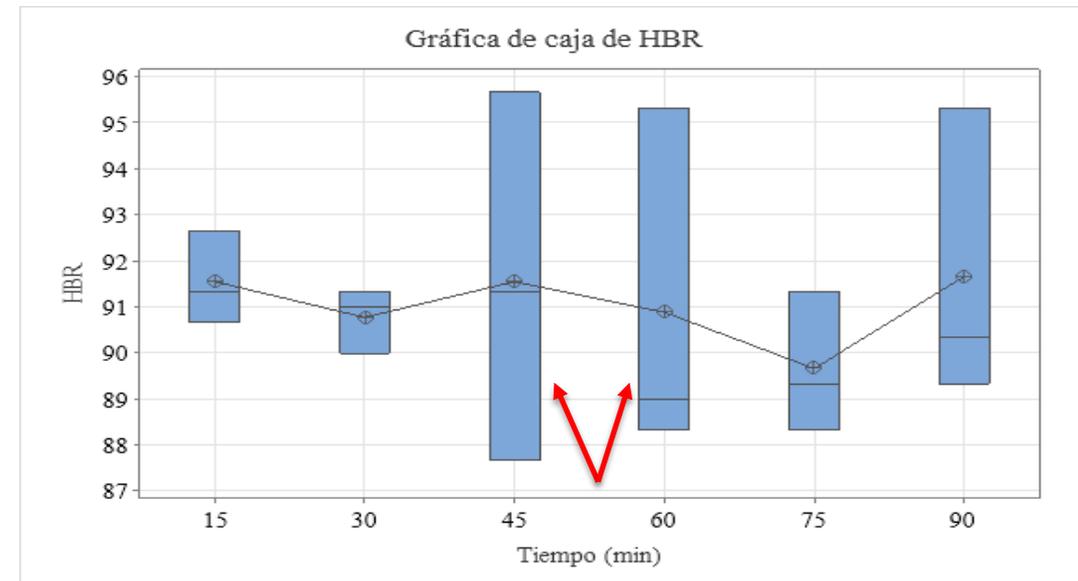


Figura 37: Gráfica de caja de la dureza en el pavonado químico en relación al tiempo de sumersión

Resultados del ensayo de Dureza - pavonado químico

Tabla 12: Agrupación del factor químico según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%. Con resultado de dureza

Químico	N	Media	Agrupación
PB 100%	6	91,83	A
PB 75%	6	91,333	A
PB 50%	6	89,889	A

Tabla 13: Agrupación del factor superficie tiempo según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con resultado de dureza

Superficie	N	Media	Agrupación
Normal	6	93,556	A
Piedra	6	90,167	B
Lijado	6	89,333	B

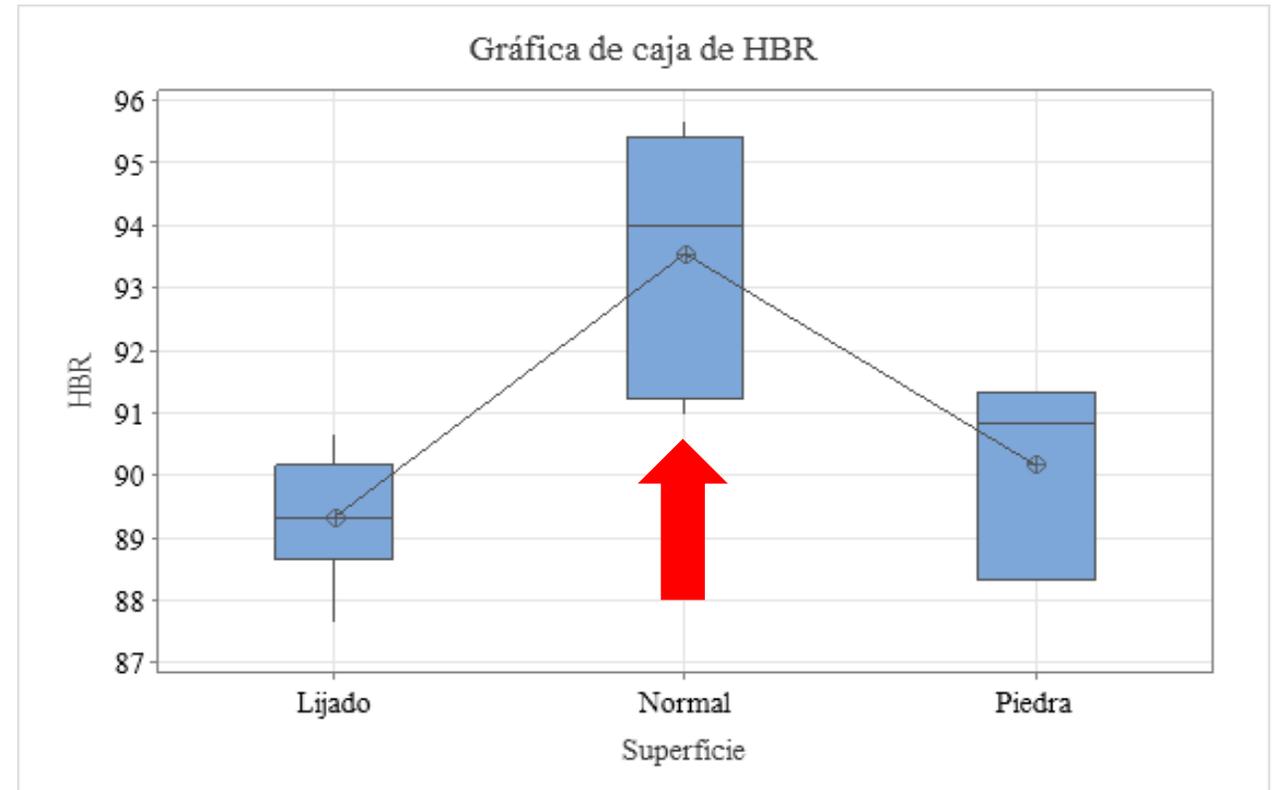


Figura 38: Representación de caja de la dureza en el pavonado químico en relación al acabado superficial

Resultados del ensayo de Dureza - pavonado químico

Gráfica de interacción para HBR Medias de datos

Tiempo (min)

Tabla 14: Datos más significativos de la interacción entre factores del pavonado químico

	Tiempo (min)	Químico	Superficie	HBR	% Variación
Max	45	PB 75%	Normal	95,67	9,546
Min	45	PB 50%	Lijado	87,67	0,385
Cercano al V.I.	45	PB 50%	Lijado	87,67	0,385

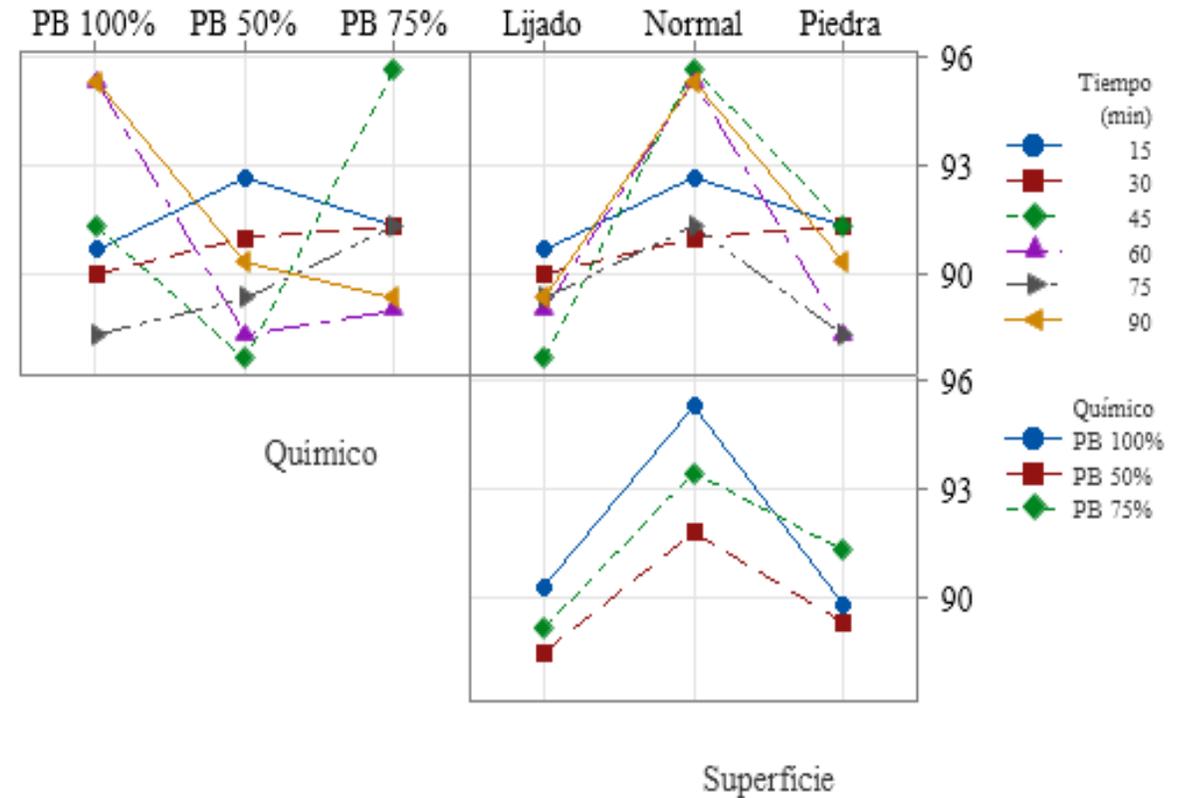
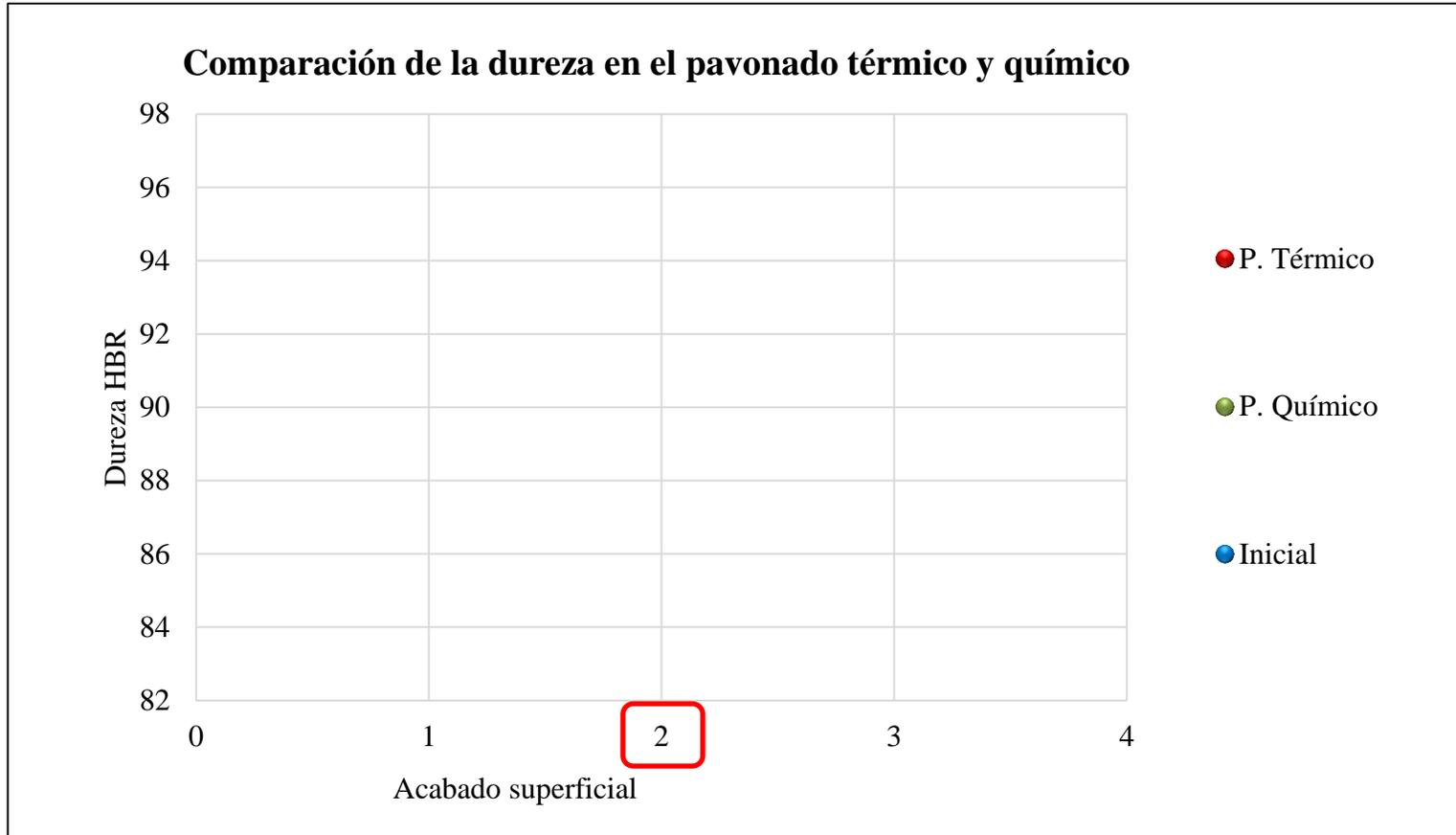


Figura 39: Interacción de factores del pavonado químico con resultados de dureza

Comparación de durezas obtenidas en ambos procesos

Figura 40: Distribución de las medias de dureza del pavonado térmico y químico en base al acabado superficial



Nota: El valor 1 corresponde al acabado superficial lijado, el valor 2 corresponde al acabado superficial normal y

el valor 3 corresponde al acabado superficial de piedra

Los valores máximos y mínimos no superan el 10% del valor original de la dureza. Esto indica que cualquiera de los dos procesos de pavonado sirve para el trabajo de recubrimiento en el cual la dureza del acero sea un factor decisivo,

Resultados de la rugosidad

Rugosidad del pavonado térmico

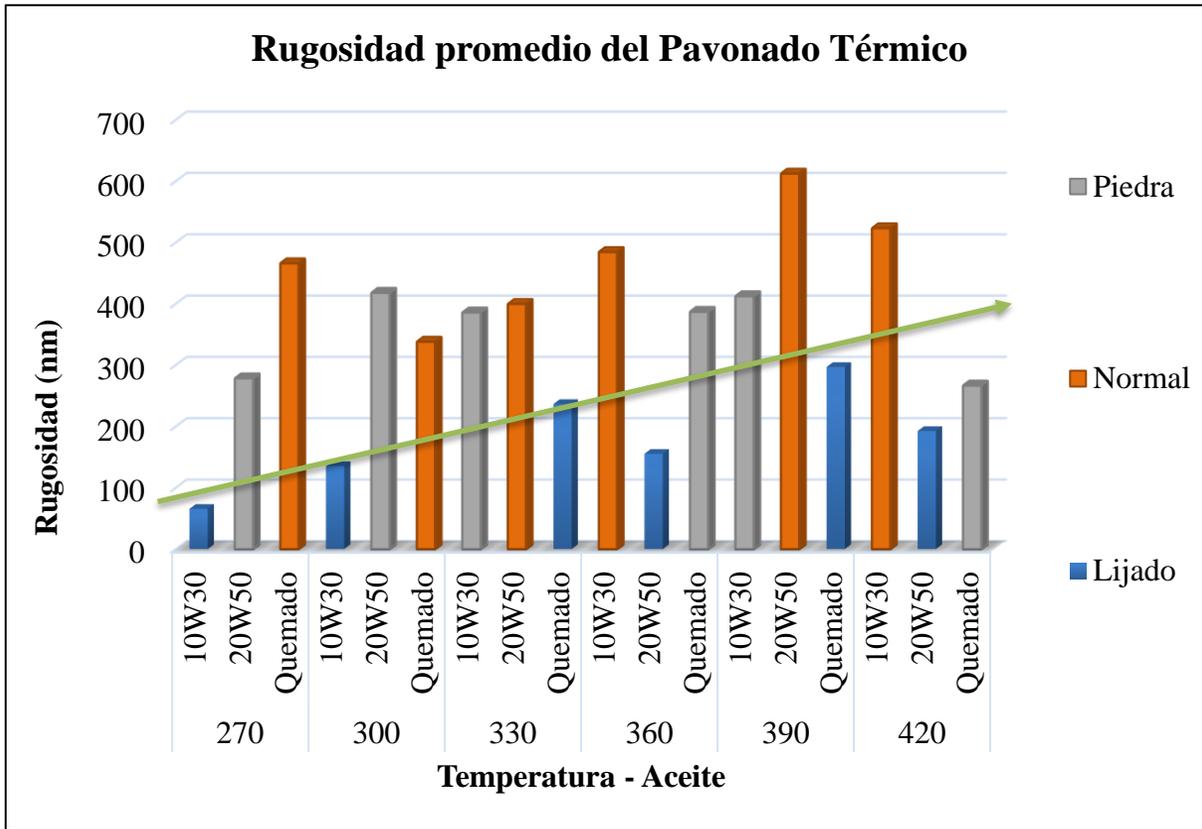


Figura 41: Comportamiento de rugosidad de las probetas después de ser aplicado el pavonado térmico

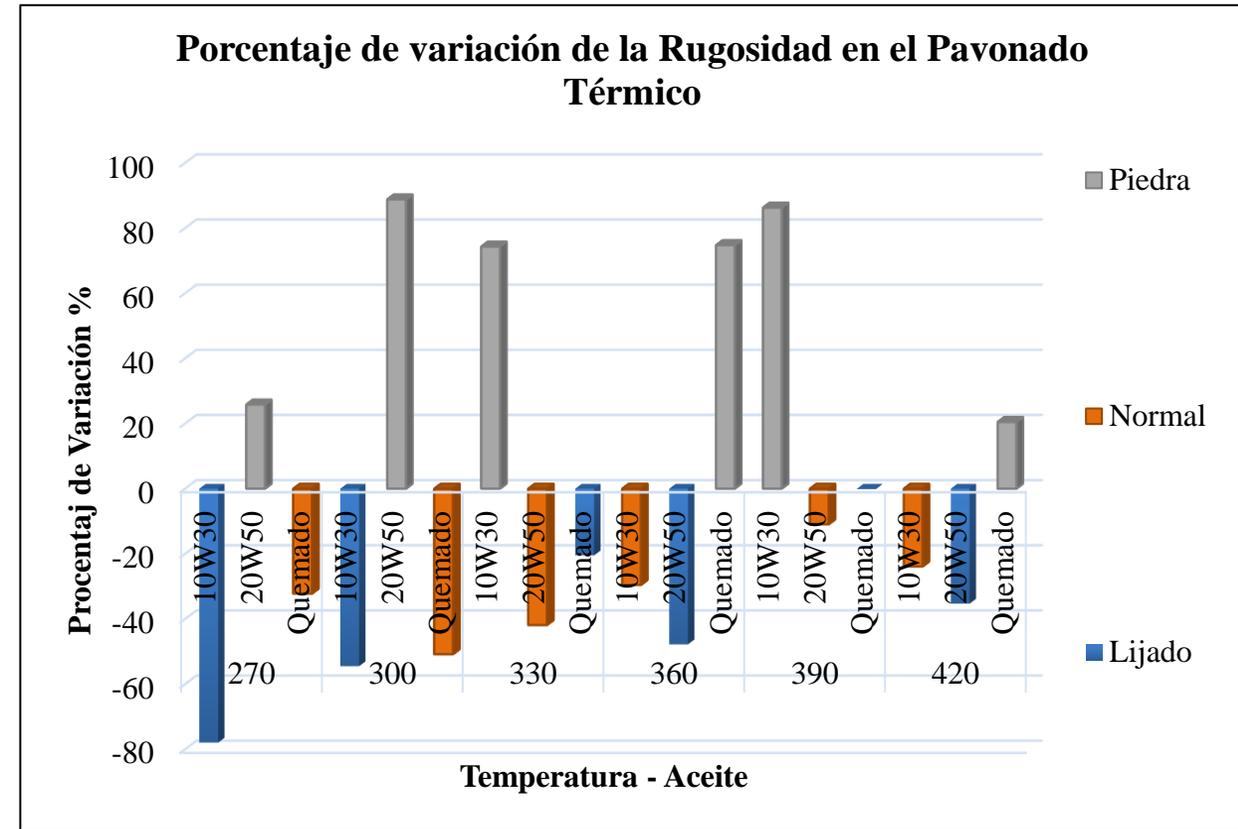


Figura 42: Crecimiento y decrecimiento de rugosidad en el pavonado térmico

Resultados de la rugosidad – pavonado térmico

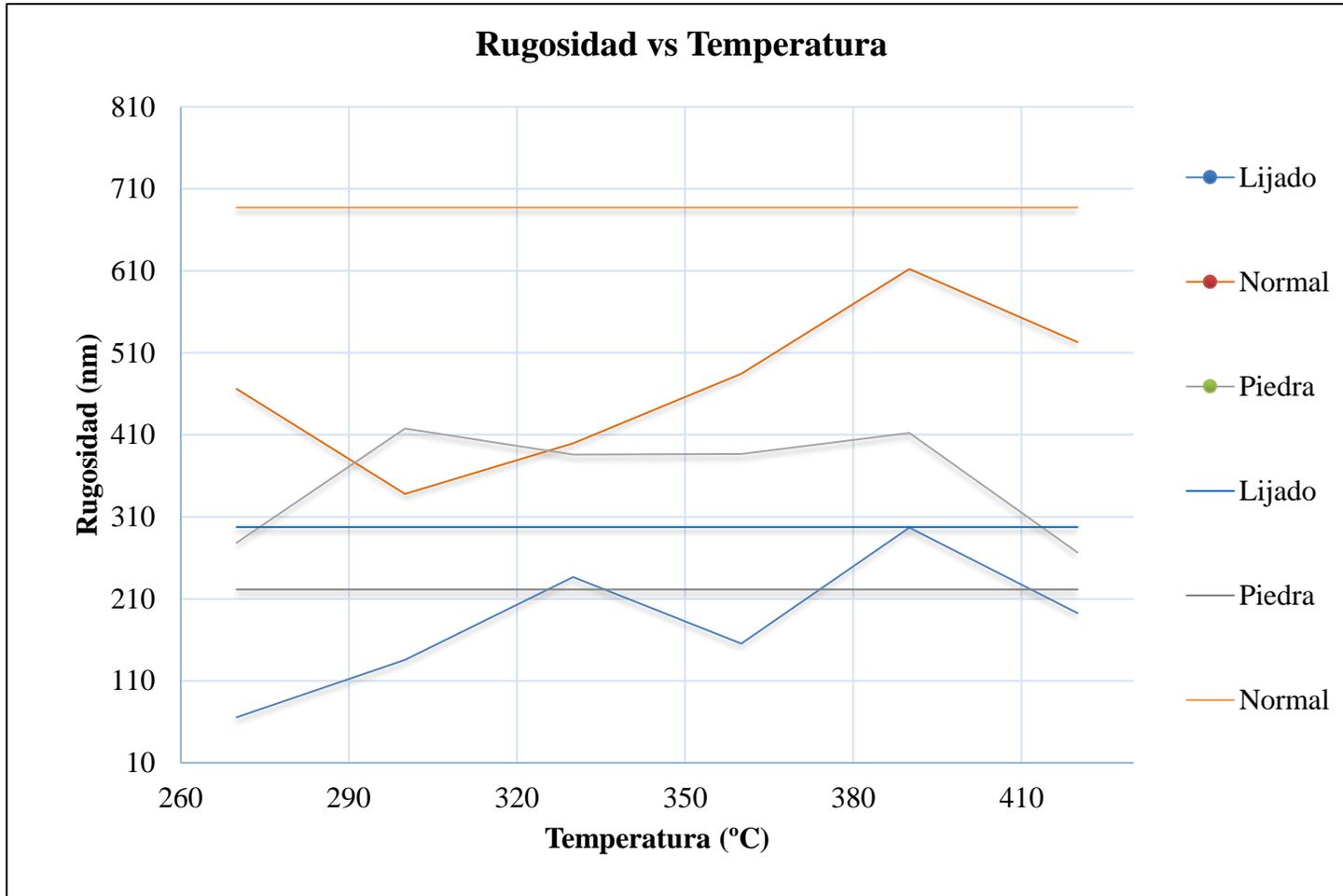


Figura 43: Comparación gráfica de la variación de rugosidad con respecto a su valor inicial en el pavonado térmico

- La rugosidad disminuye cuando la superficie tiene un acabado normal y lijado
- La rugosidad aumenta cuando la superficie tiene un acabado de piedra de rectificado

Resultados de la rugosidad – pavonado térmico

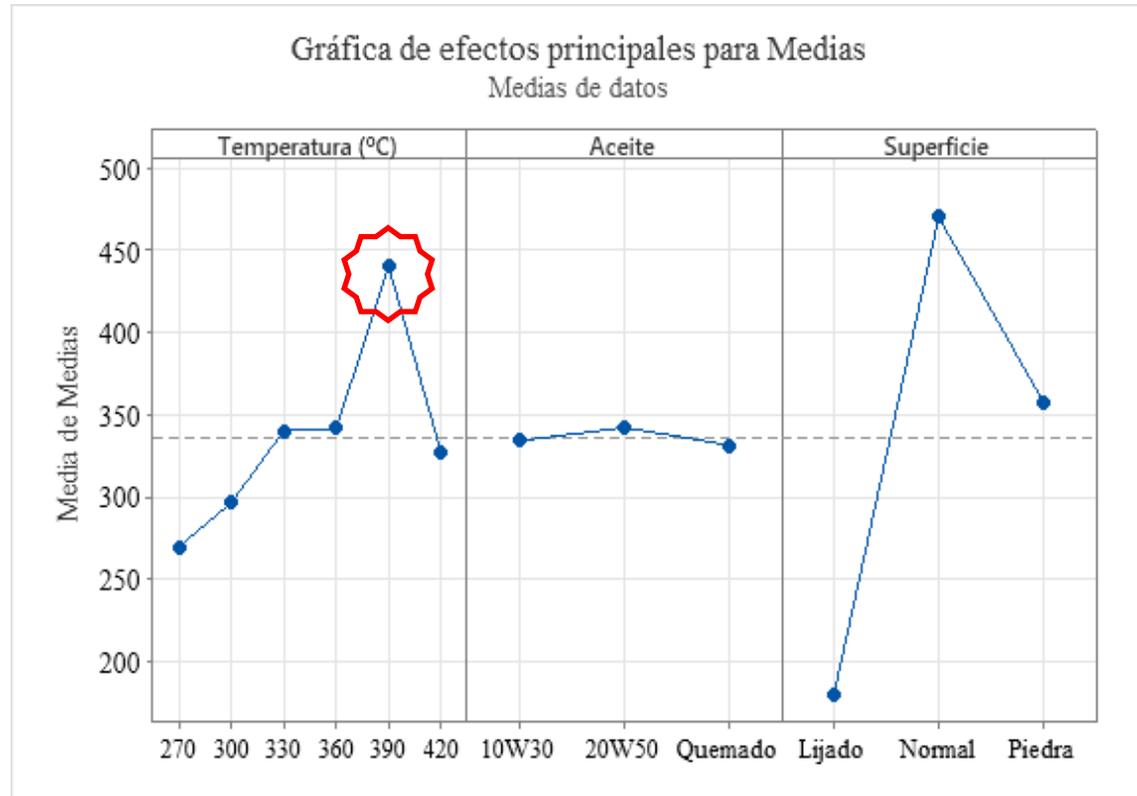


Figura 44: Comportamiento de la rugosidad en el acero según los factores del pavonado térmico por separado

Tabla 15: Agrupación del factor temperatura en la rugosidad según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con respuesta de rugosidad

Temperatura(°C)	N	Media	Agrupación
390	3	440,5	A
360	3	342,2	A
330	3	340,7	A
420	3	327	A
300	3	297,1	A
270	3	270	A

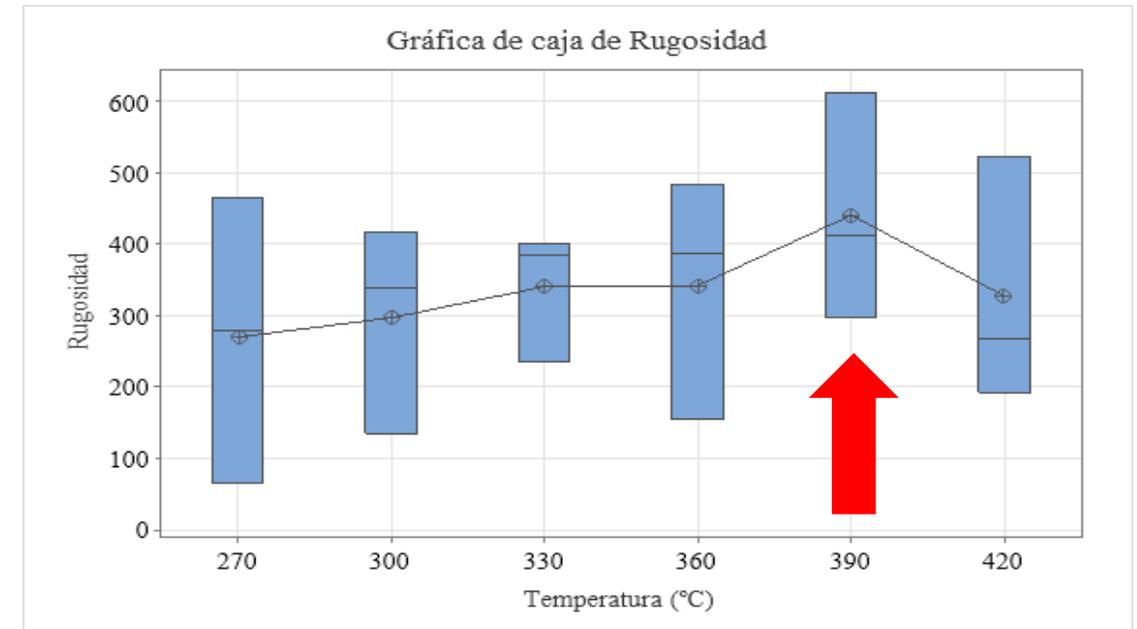


Figura 45: Representación de caja de la rugosidad en el pavonado térmico en relación a la temperatura

Resultados de la rugosidad – pavonado térmico

El aceite que menos produce cambios radicales, es decir un rango de datos disminuido, en la rugosidad es el aceite quemado.

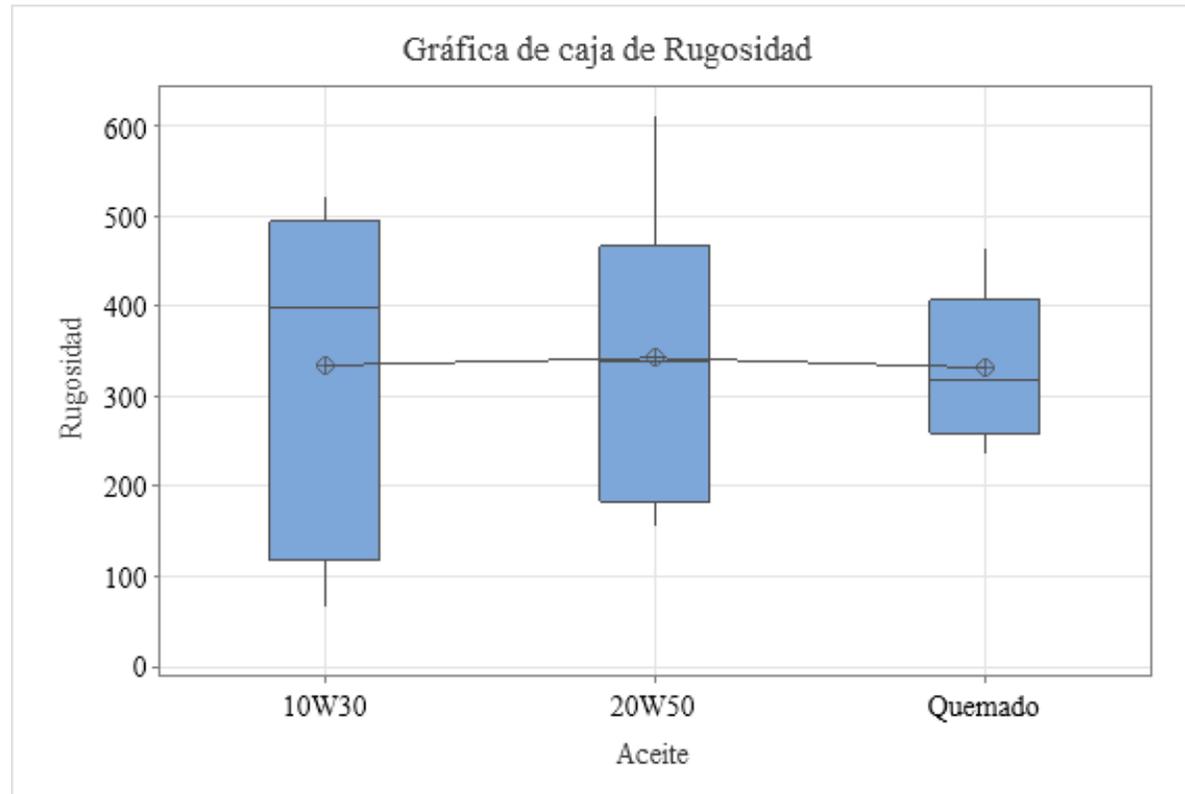


Figura 46: Representación de caja de la rugosidad en el pavonado térmico en relación al aceite usado

Resultados de la rugosidad – pavonado térmico

Gráfica de interacción para Rugosidad Medias de datos

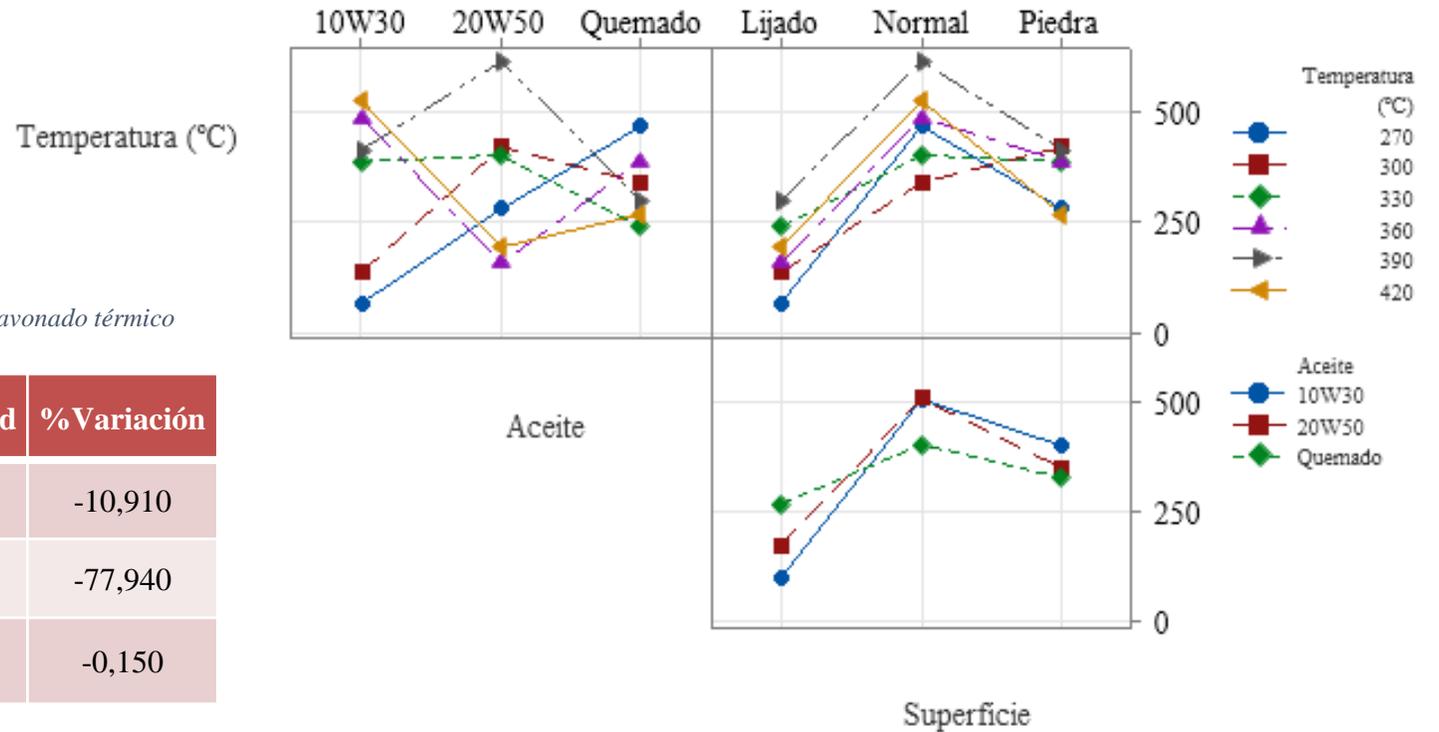


Tabla 16: Datos más significativos de rugosidad en la interacción entre factores del pavonado térmico

	Temperatura (°C)	Aceite	Superficie	Rugosidad	%Variación
Max	390	20w50	normal	612,26	-10,910
Min	270	10w30	Lijado	65,7	-77,940
Cercano al V.I.	390	Quemado	Lijado	296,98	-0,150

Figura 47: Interacción de factores del pavonado térmico con resultados de rugosidad

Resultados de la rugosidad

Rugosidad del pavonado químico

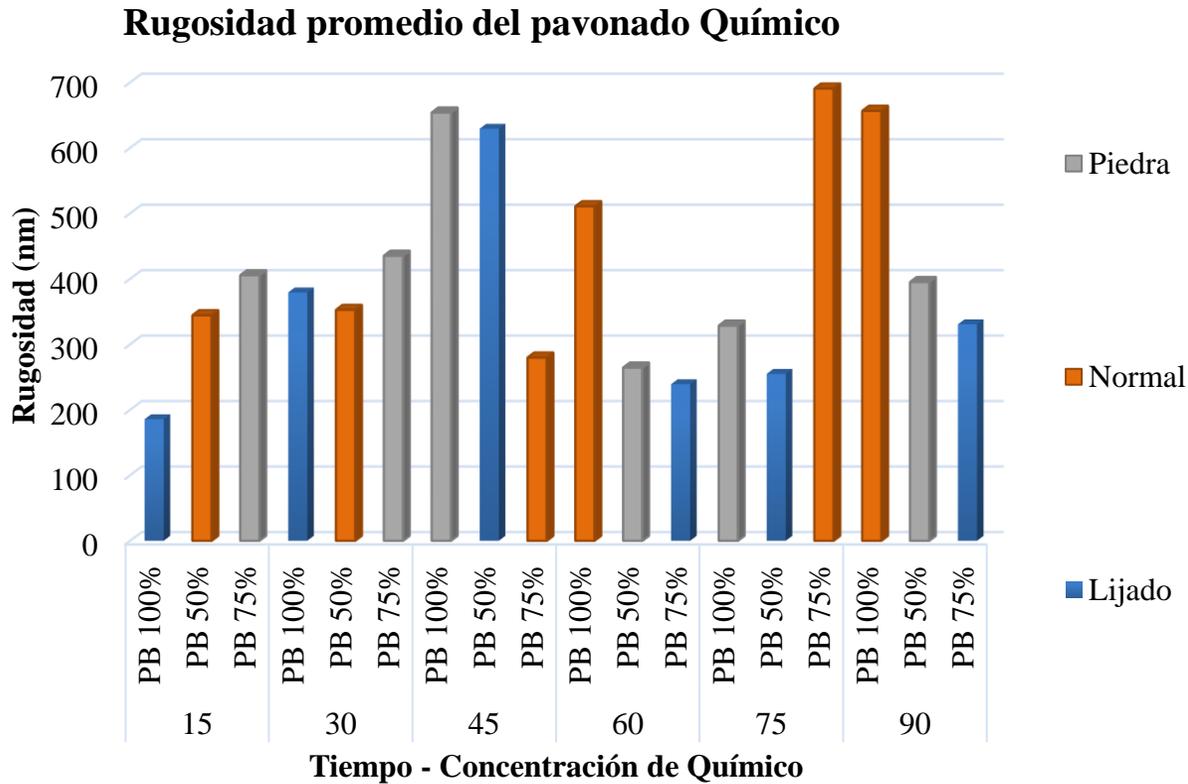


Figura 48: Comportamiento de la rugosidad de las probetas después de ser aplicado el pavonado químico

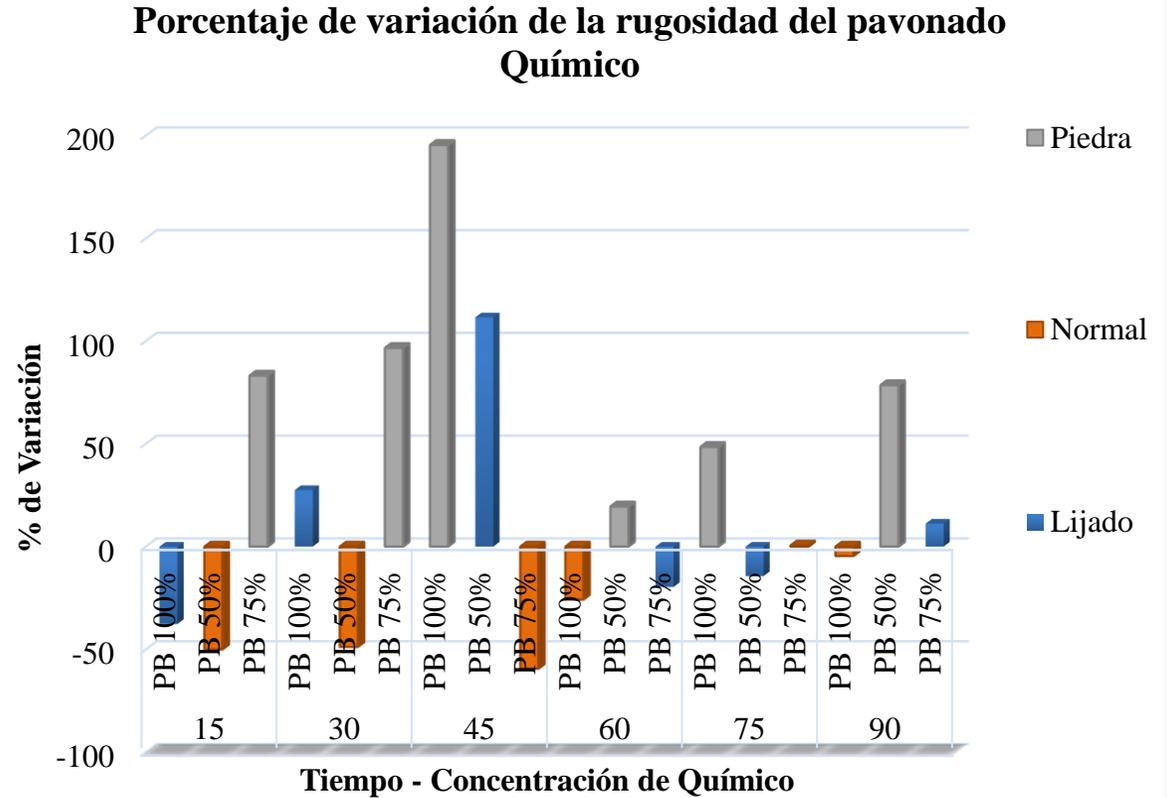


Figura 49: Crecimiento y decrecimiento de la rugosidad en el pavonado químico

Resultados de la rugosidad – pavonado químico

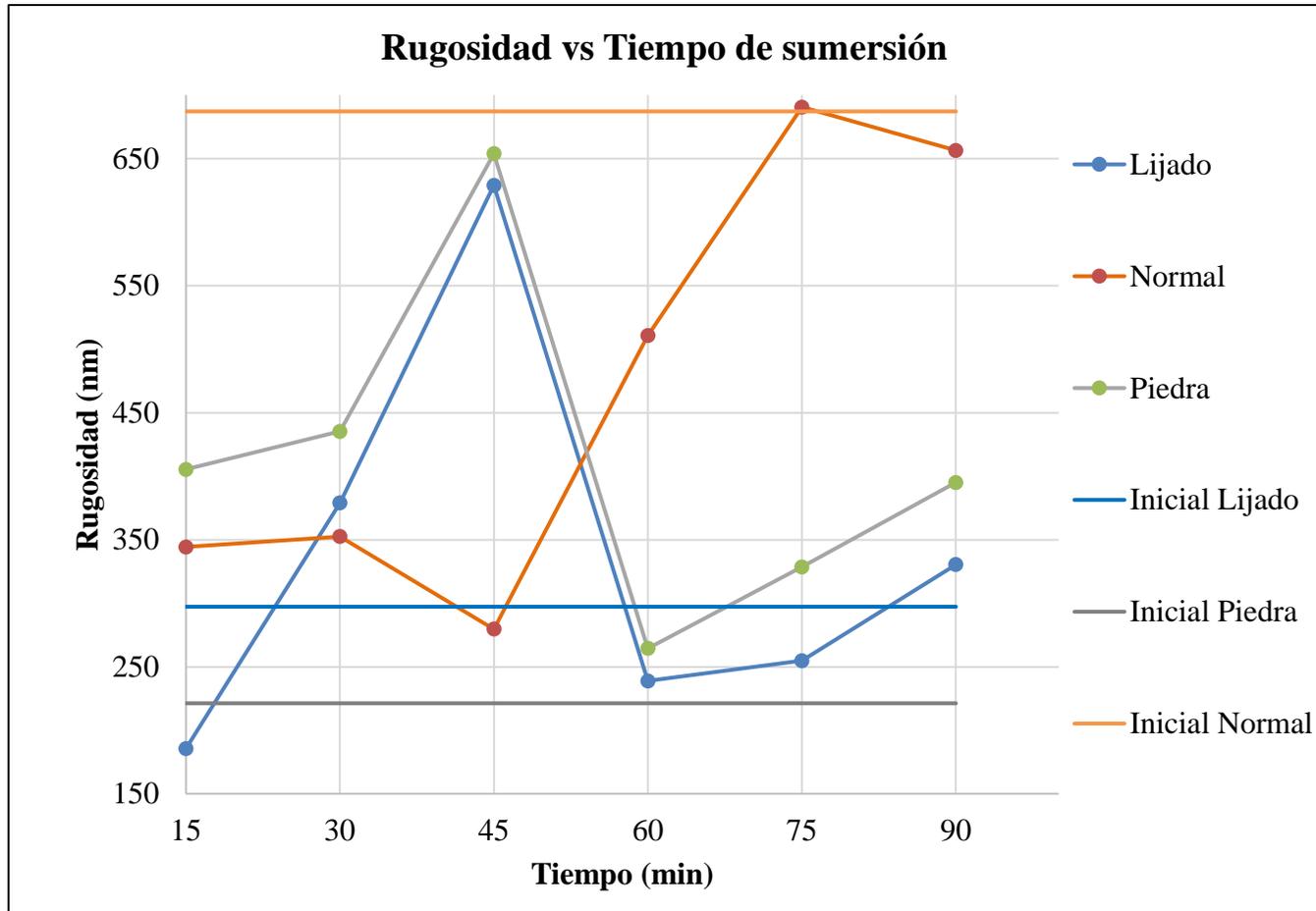


Figura 50: Comparación gráfica de la variación de rugosidad con respecto a su valor inicial en el pavonado químico

- La rugosidad tiene una tendencia creciente cuando se aumenta el tiempo de exposición al agente químico pavonador
- La rugosidad disminuye en el acabado normal y aumenta en los otros dos acabados
- Y el comportamiento del acabado lijado y rectificado en piedra son similares.

Resultados de la rugosidad – pavonado químico

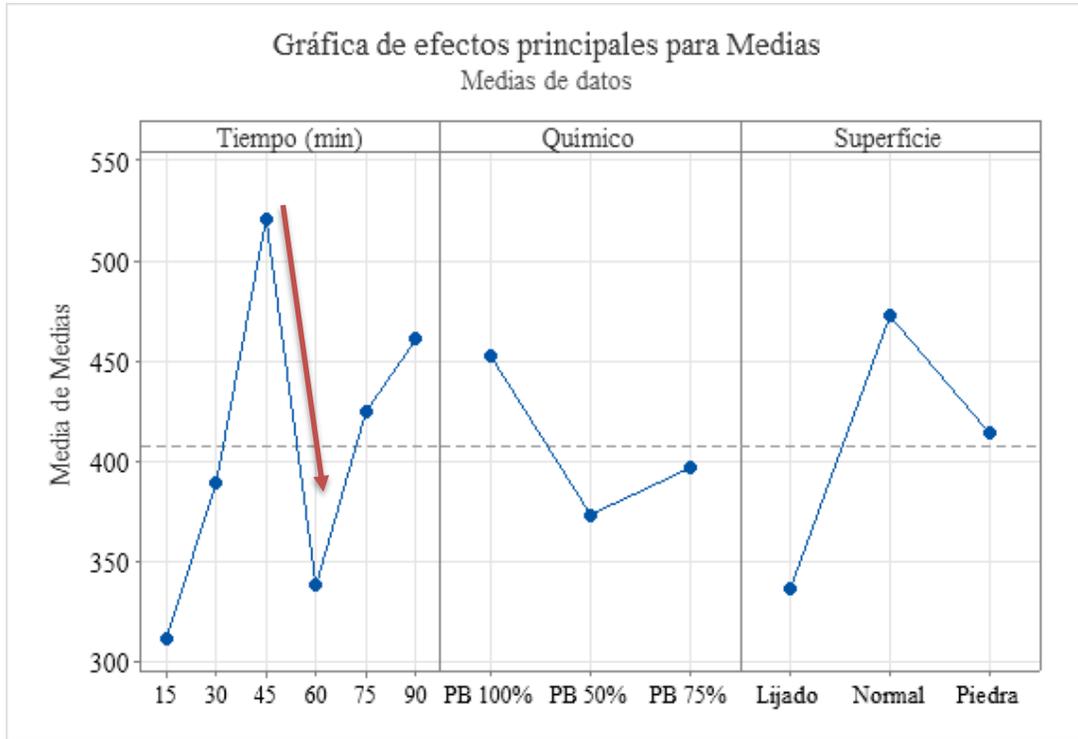


Figura 51: Comportamiento de la rugosidad en el acero según los factores del pavonado químico por separado

Tabla 17: Agrupación del factor tiempo según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, para la rugosidad en el pavonado químico

Tiempo (min)	N	Media	Agrupación
45	3	521	A
90	3	460,7	A
75	3	425	A
30	3	389,0	A
60	3	338,1	A
15	3	311,8	A

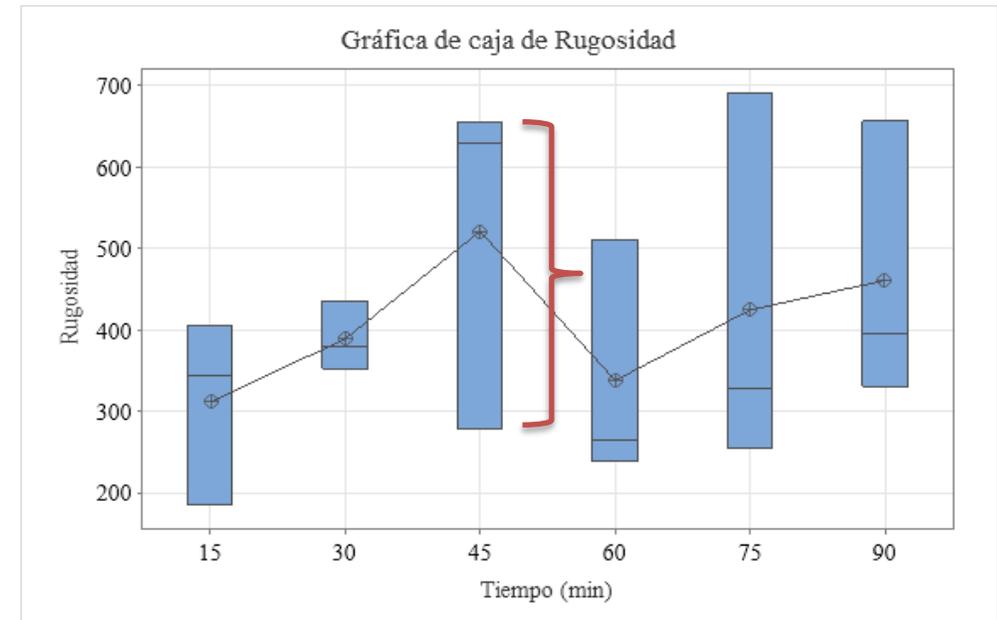


Figura 52: Gráfica de caja de la rugosidad en el pavonado químico en relación al tiempo de sumersión

Resultados de la rugosidad – pavonado químico

Mientras menos concentración del agente químico tenga la solución menor es la rugosidad obtenida.

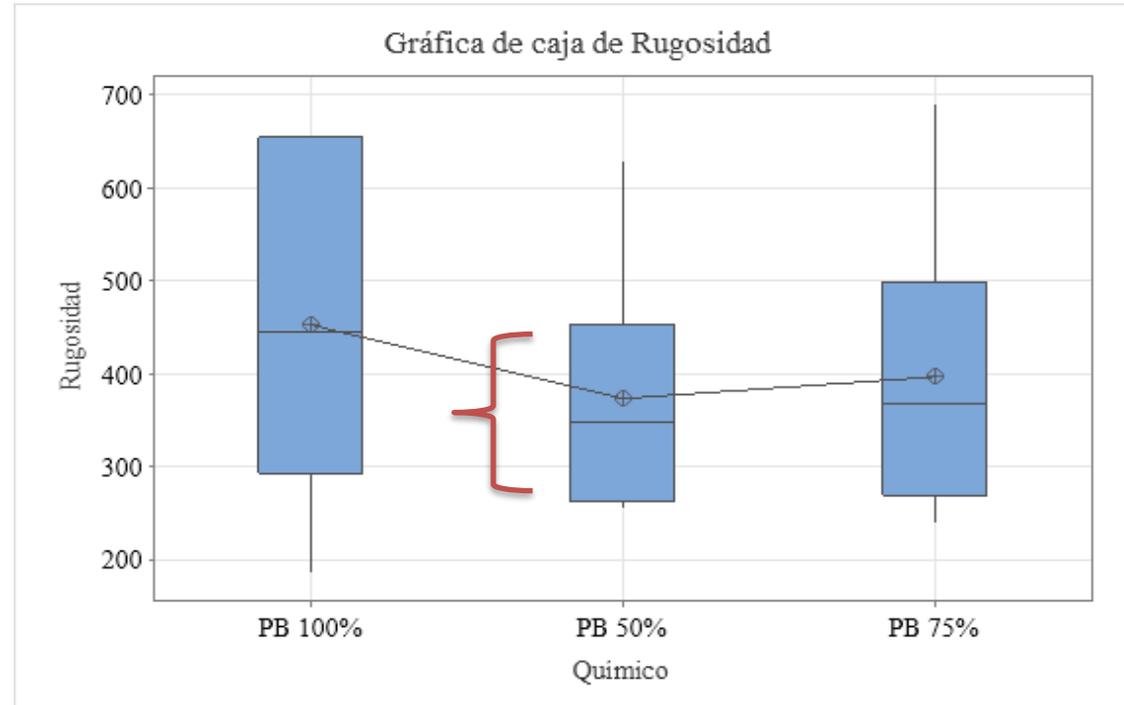


Figura 53: Gráfica de caja de la rugosidad en el pavonado químico en relación a la concentración del agente químico

Resultados de la rugosidad – pavonado químico

Gráfica de interacción para Rugosidad Medias de datos

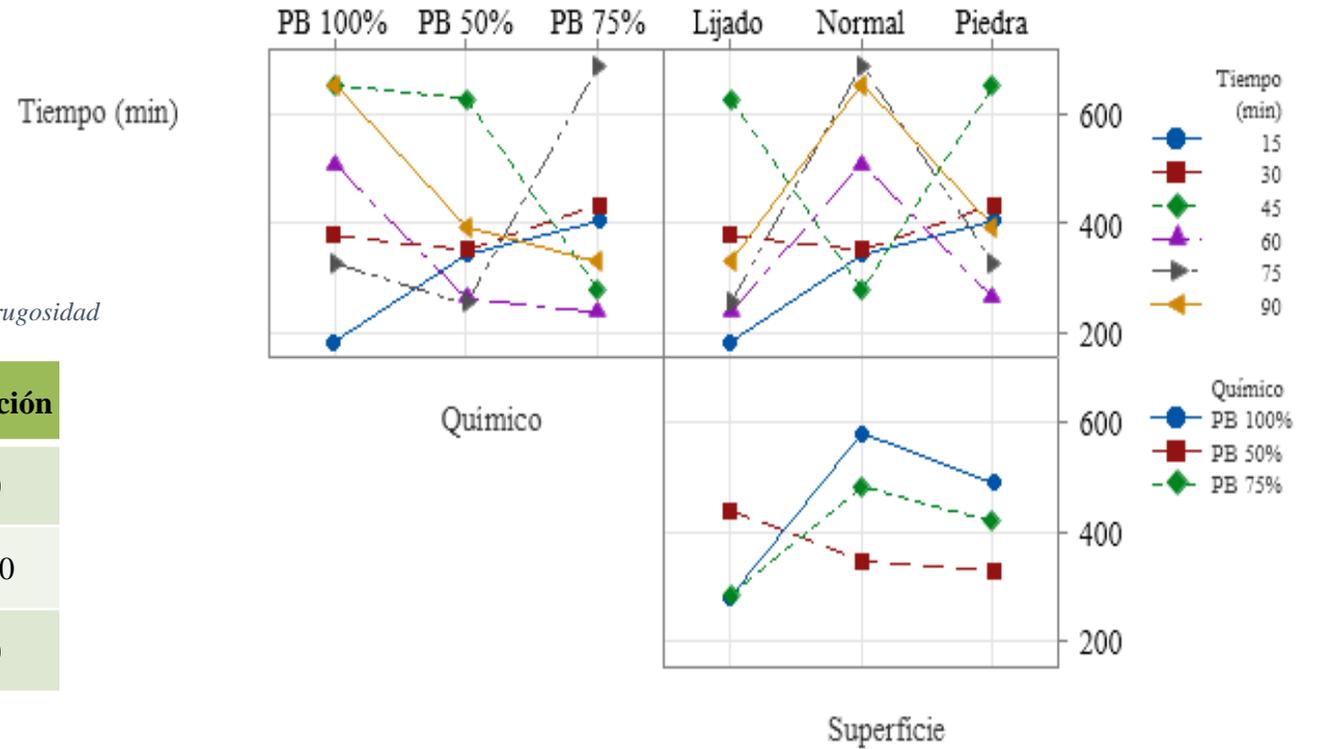


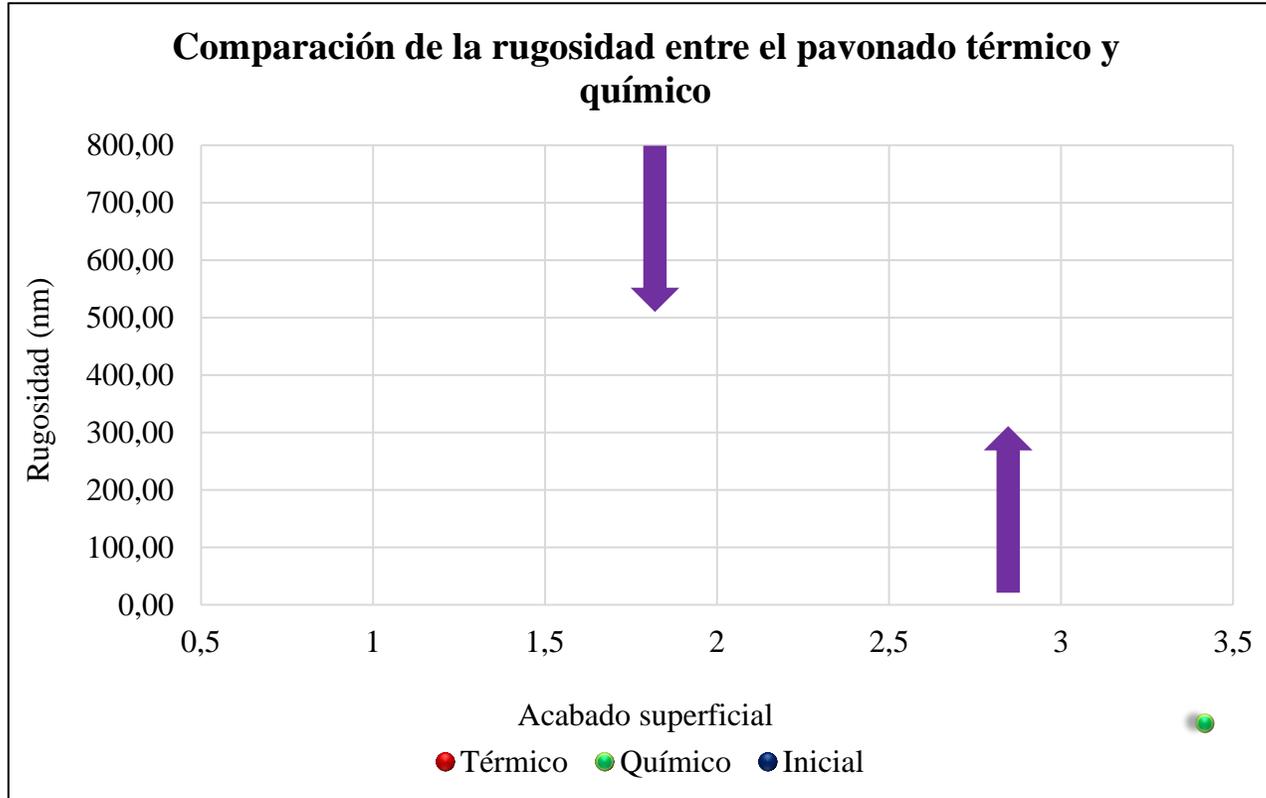
Tabla 18: Datos más significativos de la interacción entre factores del pavonado químico en cuanto a rugosidad

	Tiempo (min)	Químico	Superficie	Rugosidad	% Variación
Max	75	PB 75%	Normal	690,56	0,480
Min	15	PB 100%	Lijado	185,58	-62,430
Cercano al V.I.	75	PB 75%	Normal	690,56	0,480

Figura 54: Interacción de factores del pavonado químico con resultados de rugosidad

Comparación de rugosidad obtenido en ambos procesos

Figura 55: Distribución de las medias de rugosidad del pavonado térmico y químico en base al acabado superficial



Nota: El valor 1 corresponde al acabado superficial lijado, el valor 2 corresponde al acabado superficial normal y el valor 3 corresponde al acabado superficial de piedra

Para el pavonado térmico se observó una reducción de rugosidad cuando se trabajó con el acabado lijado y normal, y un aumento en el acabado de piedra de rectificar.

Para el pavonado químico se obtuvo un aumento de rugosidad en los acabados lijado y de piedra de rectificar, y para el acabado normal se tuvo una disminución.

Resistencia a la Corrosión

Se realizaron 3 sumersiones por probeta para determinar el avance de la corrosión y el porcentaje de resistencia que ofrece cada proceso de pavonado

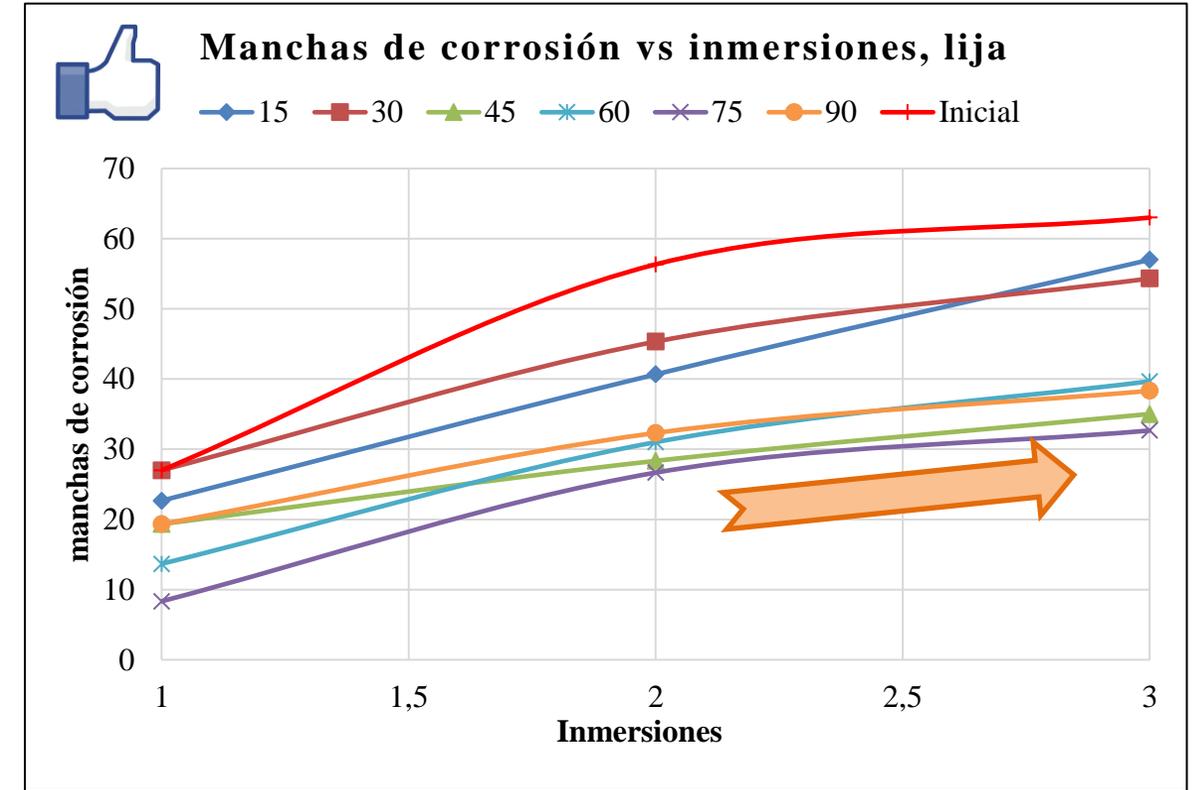
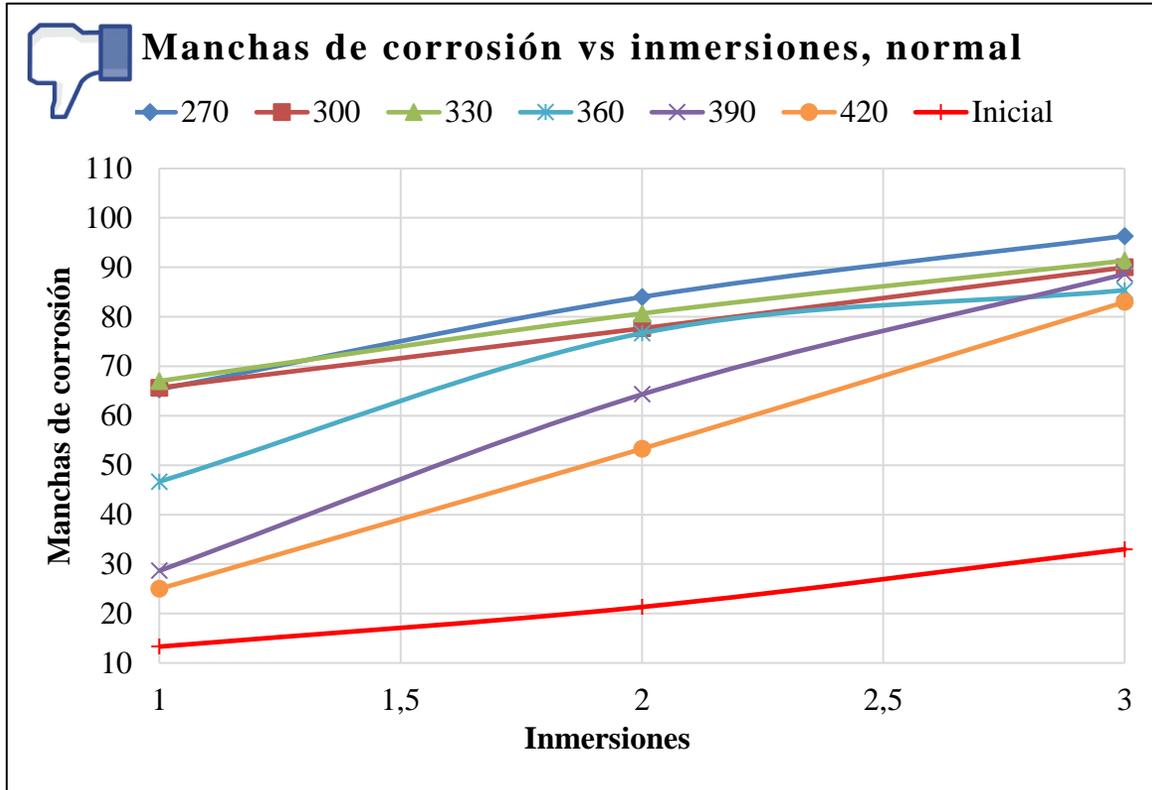


Figura 56: Manchas de corrosión presentes en las probetas de pavonado térmico con acabado superficial normal

Figura 57: Manchas de corrosión presentes en las probetas de pavonado químico con acabado superficial normal

Resistencia a la Corrosión – pavonado térmico

Las probetas de pavonado térmico que tenían como temperaturas de trabajo valores menores a 390°C fueron corroídas completamente y todo su color se desvaneció.



Figura 58: Probetas oxidadas después del ensayo de inmersión alternada

Resistencia a la Corrosión – pavonado térmico

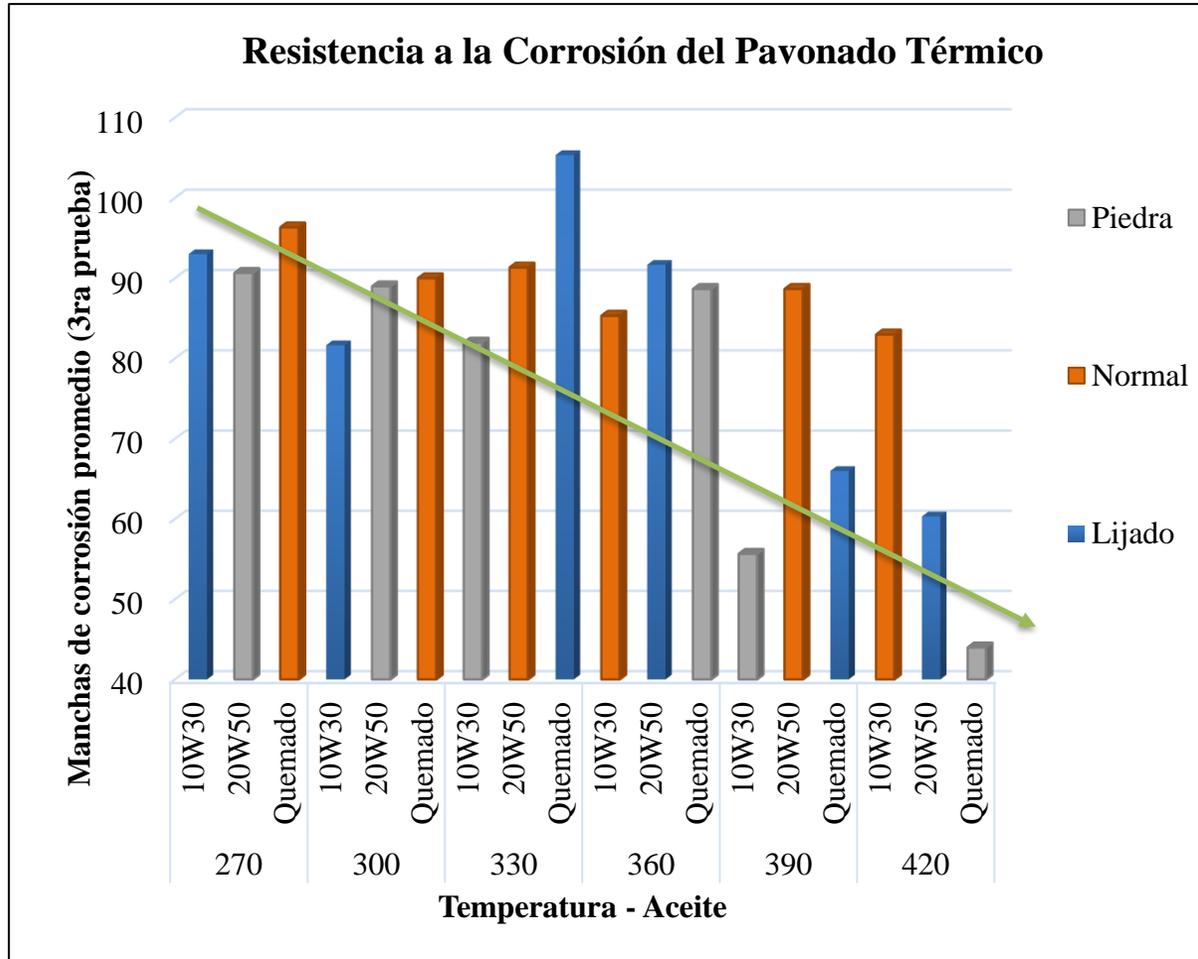


Tabla 19: Valores del promedio de manchas de corrosión en las probetas de pavonado térmico

Código	Promedios			% Manchas			G-RC		
	s1	s2	s3	s1	s2	s3	s1	s2	s3
A1	54,33	77,67	93,00	101,23	37,87	47,62	2	2	2
A2	55,00	74,33	90,67	251,06	110,38	100,00	2	2	2
A3	65,33	84,00	96,33	390,00	293,75	191,92	2	2	2
A4	36,67	60,00	81,67	35,80	6,51	29,63	3	2	2
A5	42,33	73,67	89,00	170,21	108,49	96,32	3	2	2
A6	65,67	77,67	90,00	392,50	264,06	172,73	2	2	2
A7	72,67	75,33	82,00	363,83	113,21	80,88	2	2	2
A8	67,00	80,67	91,33	402,50	278,13	176,77	2	2	2
A9	76,67	82,67	105,33	183,95	46,75	67,20	2	2	1
A10	46,67	76,67	85,33	250,00	259,38	158,59	3	2	2
A11	56,67	83,00	91,67	109,88	47,34	45,50	2	2	2
A12	35,67	63,67	88,67	127,66	80,19	95,59	3	2	2
A13	21,67	39,67	55,67	38,30	12,26	22,79	4	3	2
A14	28,67	64,33	88,67	115,00	201,56	168,69	3	2	2
A15	33,67	59,67	66,00	24,69	5,92	4,76	3	2	2
A16	25,00	53,33	83,00	87,50	150,00	151,52	4	2	2
A17	25,00	48,67	60,33	-7,41	-13,61	-4,23	4	3	2
A18	16,33	29,67	44,00	4,26	-16,04	-2,94	4	3	3

Figura 59: Número de manchas promedio obtenido en la tercera sumersión para las probetas de pavonado térmico

Resistencia a la Corrosión – pavonado térmico

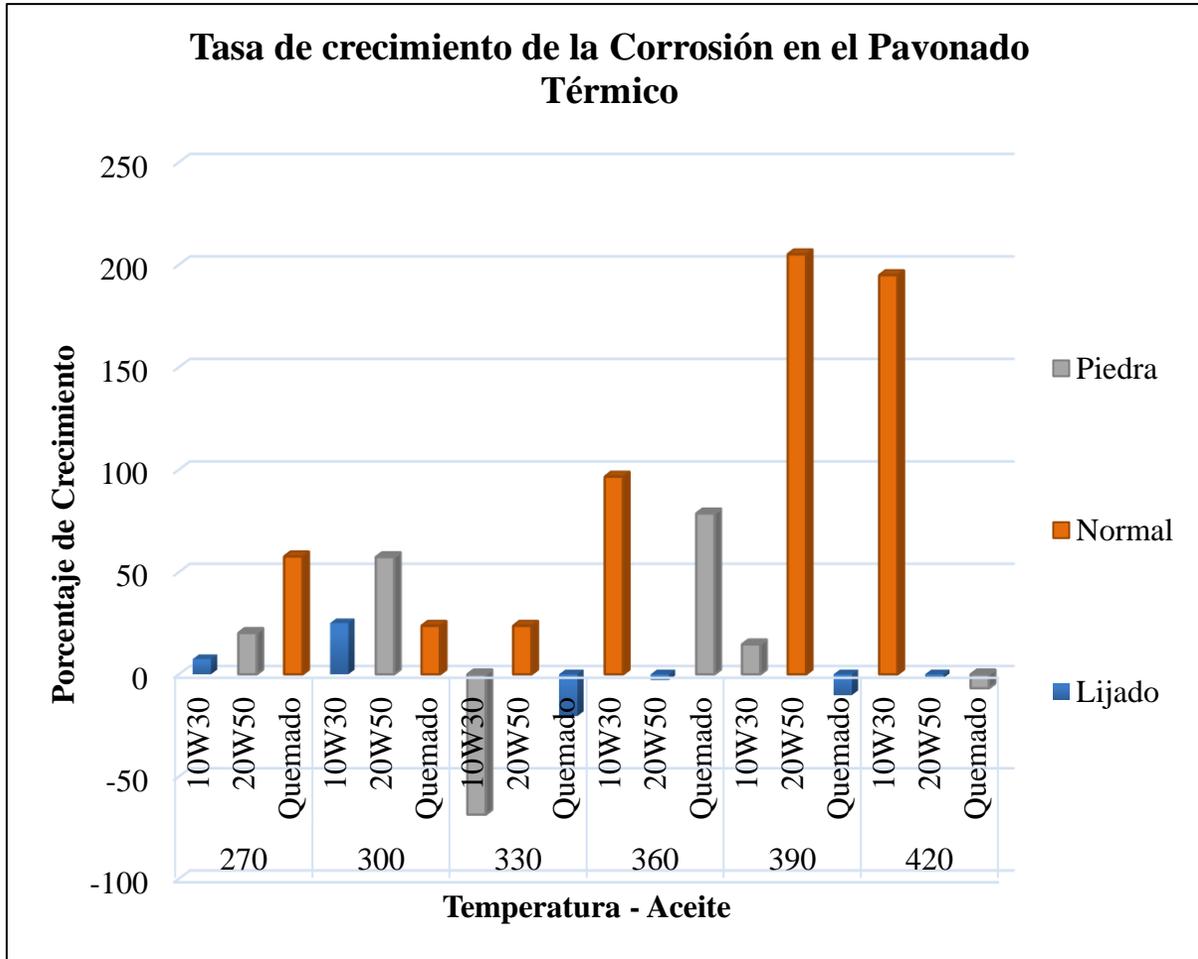


Figura 60: Tasa de crecimiento de la corrosión en el pavonado térmico con sus distintas variaciones

Tabla 21: Porcentaje de crecimiento y propagación de la corrosión en las probetas de pavonado térmico

Código	Promedios				% Crecimiento
	s3	s2	s1	m	
A1	93,00	77,67	54,33	19,33	7,407
A2	90,67	74,33	55,00	17,83	20,225
A3	96,33	84,00	65,33	15,50	57,627
A4	81,67	60,00	36,67	22,50	25,000
A5	89,00	73,67	42,33	23,33	57,303
A6	90,00	77,67	65,67	12,17	23,729
A7	82,00	75,33	72,67	4,67	-68,539
A8	91,33	80,67	67,00	12,17	23,729
A9	105,33	82,67	76,67	14,33	-20,370
A10	85,33	76,67	46,67	19,33	96,610
A11	91,67	83,00	56,67	17,50	-2,778
A12	88,67	63,67	35,67	26,50	78,652
A13	55,67	39,67	21,67	17,00	14,607
A14	88,67	64,33	28,67	30,00	205,085
A15	66,00	59,67	33,67	16,17	-10,185
A16	83,00	53,33	25,00	29,00	194,915
A17	60,33	48,67	25,00	17,67	-1,852
A18	44,00	29,67	16,33	13,83	-6,742
Lijado	27,00	56,33	63,00	18,00	
Piedra	15,67	35,33	45,33	14,83	
Normal	13,33	21,33	33,00	9,83	

Resistencia a la Corrosión – pavonado térmico

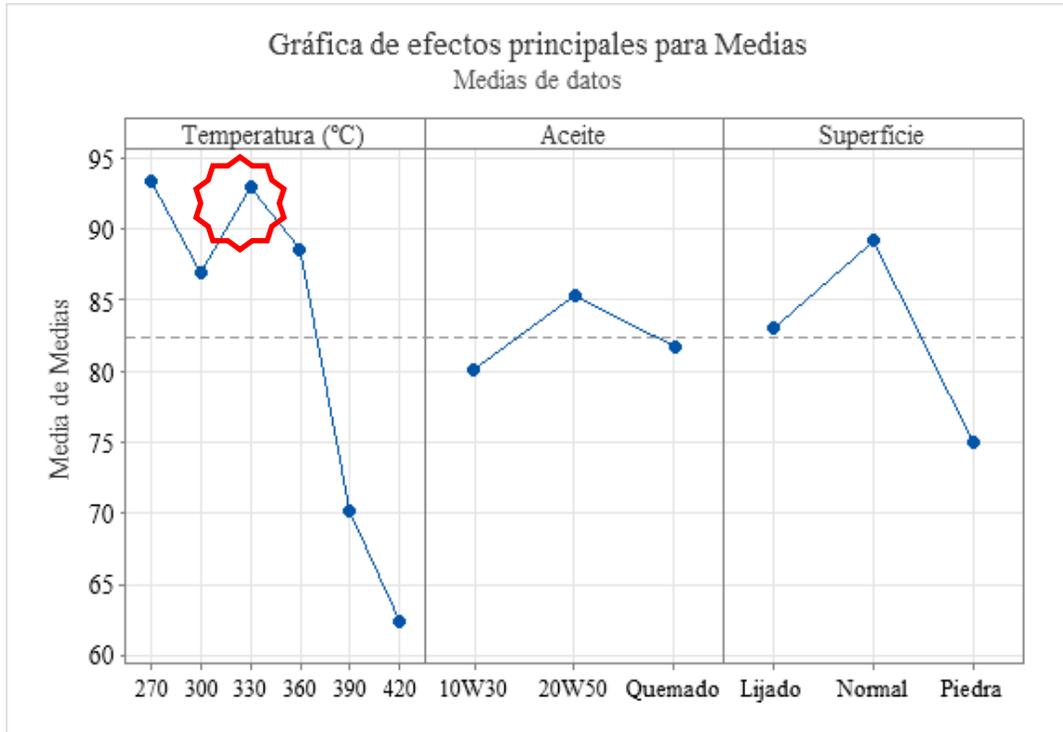


Figura 61: Resistencia a la corrosión en el acero según los factores del pavonado térmico por separado

Tabla 22: Agrupación del factor temperatura según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con resultados de manchas de corrosión

Temperatura (°C)	N	Media	Agrupación		
270	3	93,33	A		
330	3	92,89	A		
360	3	88,56	A	B	
300	3	86,89	A	B	
390	3	70,11		B	C
420	3	62,4			C

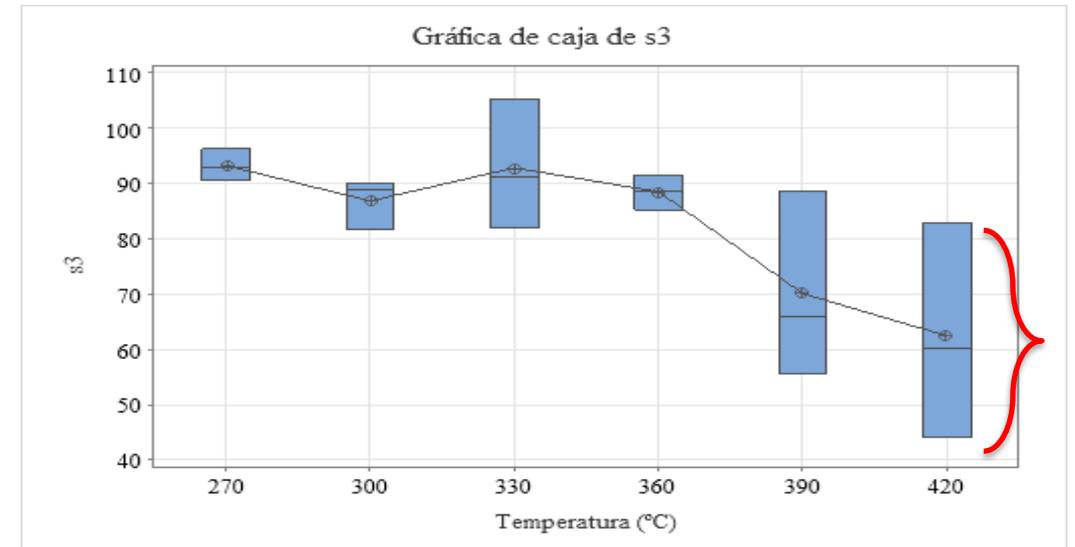


Figura 62: Representación de caja para las manchas de corrosión en el pavonado térmico en relación con la temperatura

Resistencia a la Corrosión – pavonado térmico

Los datos del aceite quemado son bastante dispersos, alcanzando un rango demasiado grande.

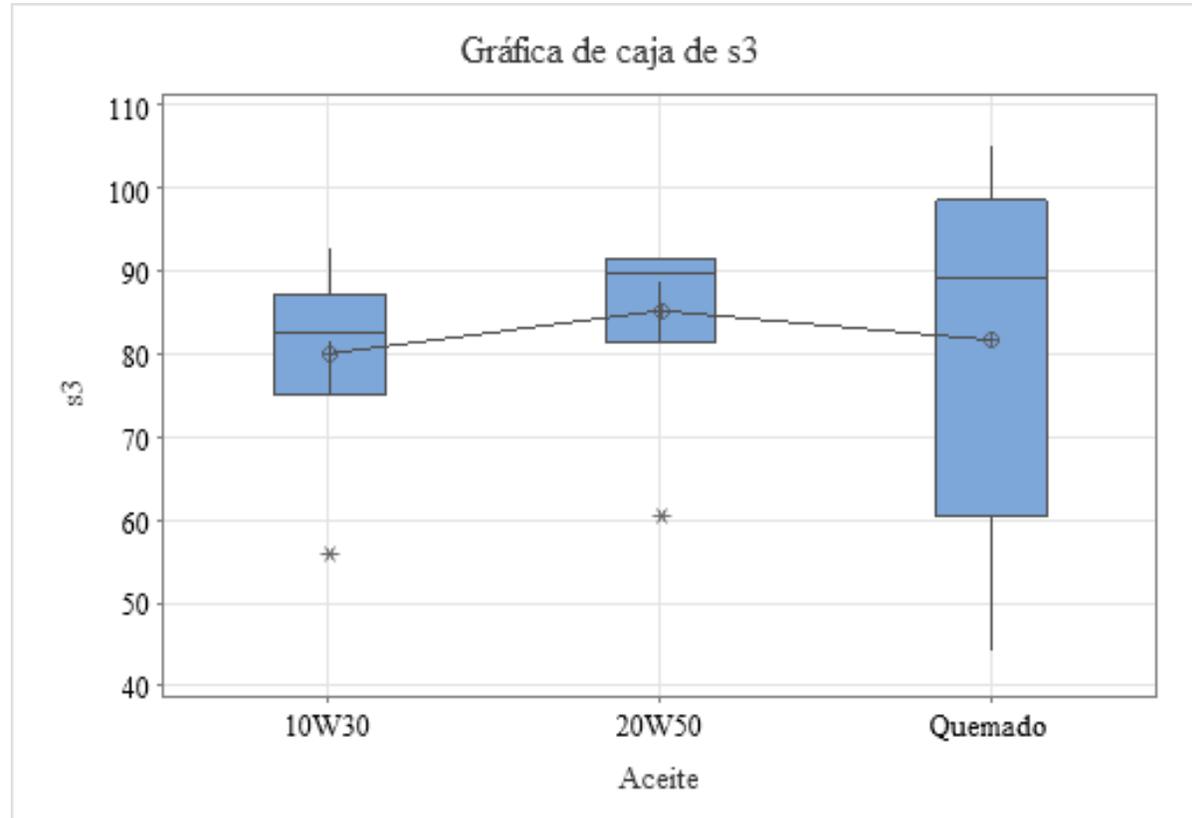


Figura 63: Representación de caja para las manchas de corrosión en el pavonado térmico en relación con el aceite

Resistencia a la Corrosión – pavonado térmico

Tabla 23: Datos más significativos de la interacción entre factores del pavonado térmico para la resistencia a la corrosión

	Temperatura (°C)	Aceite	Superficie	Manchas
Max	330	Quemado	Lijado	105,33
Min	420	Quemado	Piedra	44

Gráfica de interacción para s3 Medias de datos

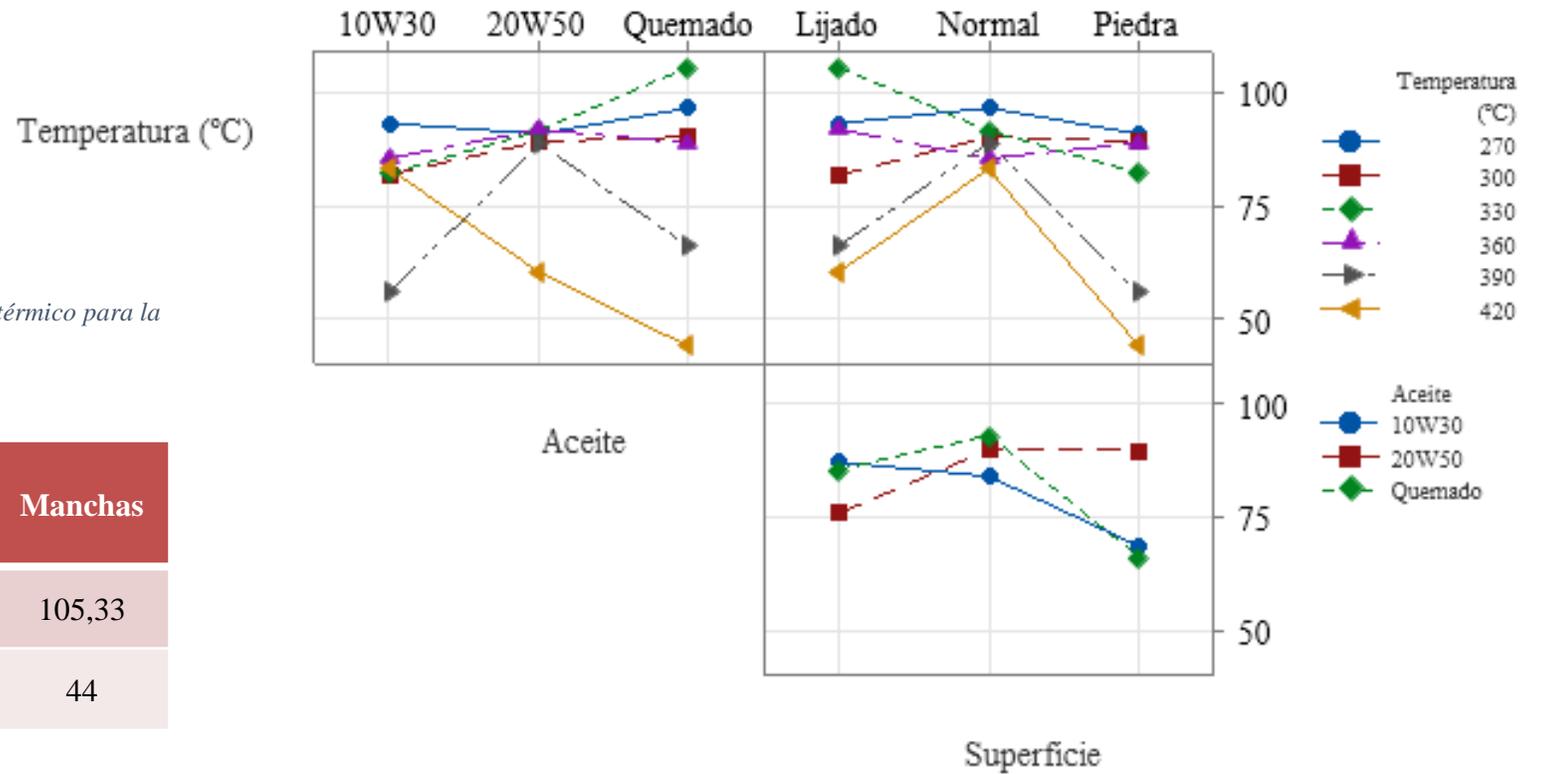


Figura 64: Interacción de factores del pavonado térmico con resultados de resistencia a la corrosión para la última inmersión

Resistencia a la Corrosión – pavonado químico

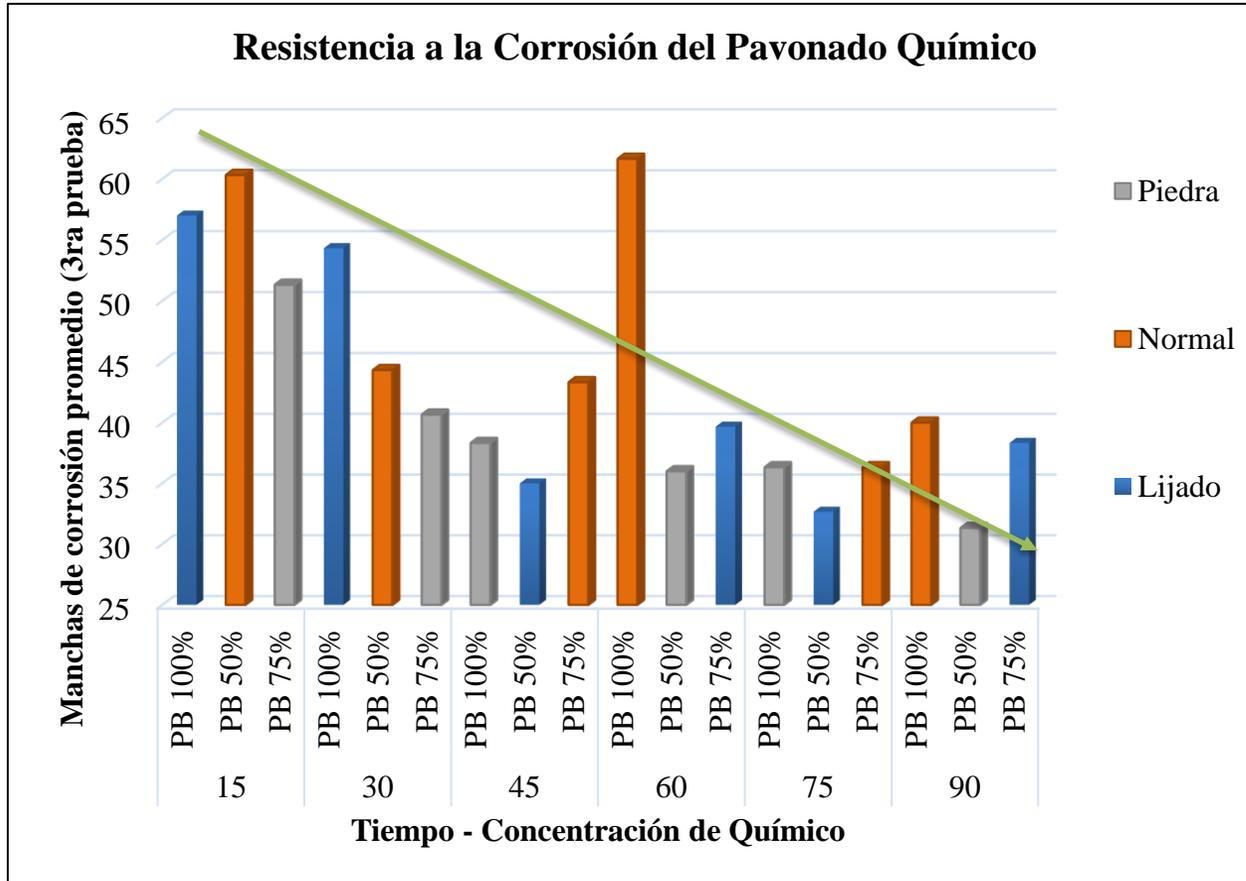


Figura 65: Número de manchas promedio obtenido en la tercera sumersión para las probetas de pavonado químico

Tabla 24: Valores del promedio de manchas de corrosión en las probetas de pavonado químico

Código	Promedios			% Manchas			G-RC		
	s1	s2	s3	s1	s1	s2	s3	s2	s1
Q1	22,67	40,67	57,00	-16,05	-27,81	-9,52	4	3	2
Q2	18,67	34,67	51,33	19,15	-1,89	13,24	4	3	2
Q3	29,00	52,00	60,33	117,50	143,75	82,83	3	2	2
Q4	27,00	45,33	54,33	0,00	-19,53	-13,76	3	3	2
Q5	24,67	34,33	40,67	57,45	-2,83	-10,29	4	3	3
Q6	26,00	30,00	44,33	95,00	40,63	34,34	3	3	3
Q7	21,00	33,33	38,33	34,04	-5,66	-15,44	4	3	3
Q8	20,67	30,33	43,33	55,00	42,19	31,31	4	3	3
Q9	19,33	28,33	35,00	-28,40	-49,70	-44,44	4	3	3
Q10	32,00	46,67	61,67	140,00	118,75	86,87	3	3	2
Q11	13,67	31,00	39,67	-49,38	-44,97	-37,04	4	3	3
Q12	15,33	30,33	36,00	-2,13	-14,15	-20,59	4	3	3
Q13	11,33	32,67	36,33	-27,66	-7,55	-19,85	5	3	3
Q14	16,33	31,33	36,33	22,50	46,88	10,10	4	3	3
Q15	8,33	26,67	32,67	-69,14	-52,66	-48,15	5	3	3
Q16	14,67	34,67	40,00	10,00	62,50	21,21	4	3	3
Q17	19,33	32,33	38,33	-28,40	-42,60	-39,15	4	3	3
Q18	14,00	27,00	31,33	-10,64	-23,58	-30,88	4	3	3

Resistencia a la Corrosión – pavonado químico

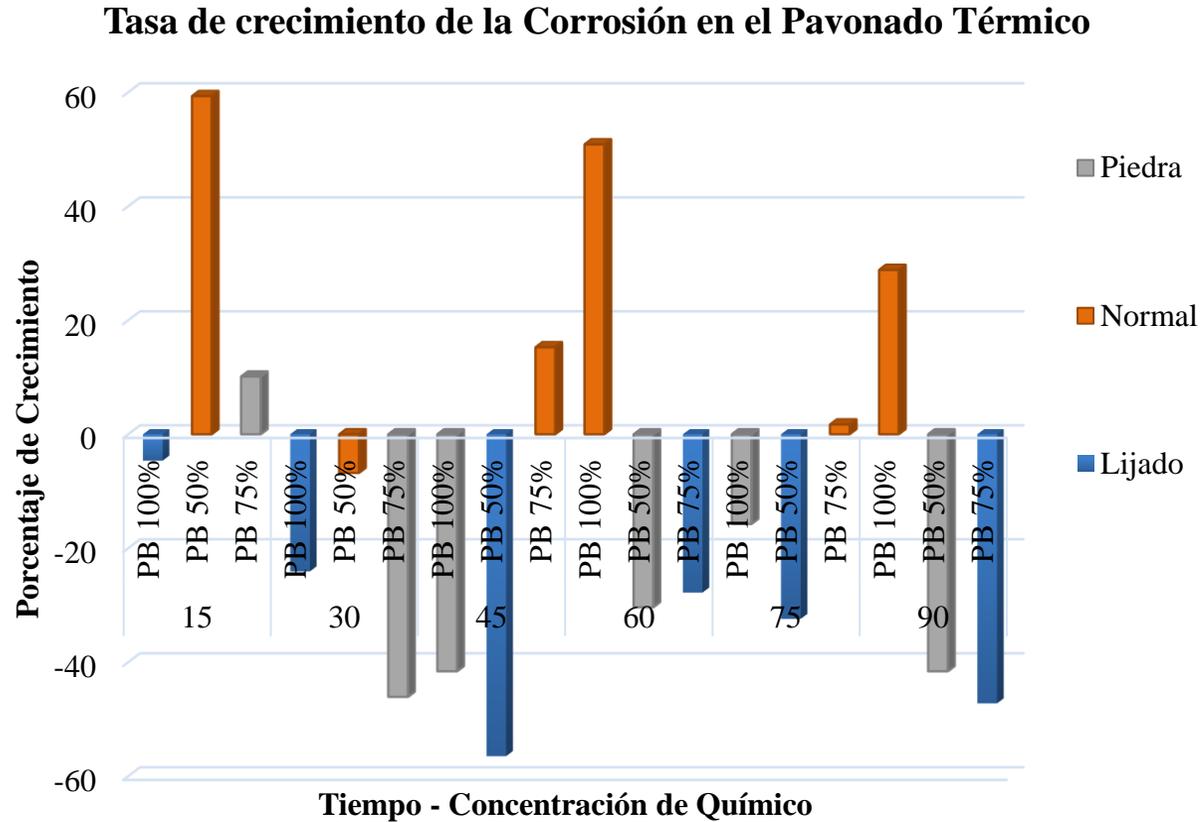


Figura 66: Tasa de crecimiento de la corrosión en el pavonado químico con sus distintas variaciones

Tabla 25: Porcentaje de crecimiento y propagación de la corrosión en las probetas de pavonado químico

Código	Promedios			m	% Variación
	n3	n2	n1		
Q1	57,00	40,67	22,67	17,167	-4,630
Q2	51,33	34,67	18,67	16,333	10,112
Q3	60,33	52,00	29,00	15,667	59,322
Q4	54,33	45,33	27,00	13,667	-24,074
Q5	40,67	34,33	24,67	8,000	-46,067
Q6	44,33	30,00	26,00	9,167	-6,780
Q7	38,33	33,33	21,00	8,667	-41,573
Q8	43,33	30,33	20,67	11,333	15,254
Q9	35,00	28,33	19,33	7,833	-56,481
Q10	61,67	46,67	32,00	14,833	50,847
Q11	39,67	31,00	13,67	13,000	-27,778
Q12	36,00	30,33	15,33	10,333	-30,337
Q13	36,33	32,67	11,33	12,500	-15,730
Q14	36,33	31,33	16,33	10,000	1,695
Q15	32,67	26,67	8,33	12,167	-32,407
Q16	40,00	34,67	14,67	12,667	28,814
Q17	38,33	32,33	19,33	9,500	-47,222
Q18	31,33	27,00	14,00	8,667	-41,573
Lijado	27,00	56,33	63,00	18,000	
Piedra	15,67	35,33	45,33	14,833	
Normal	13,33	21,33	33,00	9,833	

Resistencia a la Corrosión – pavonado químico

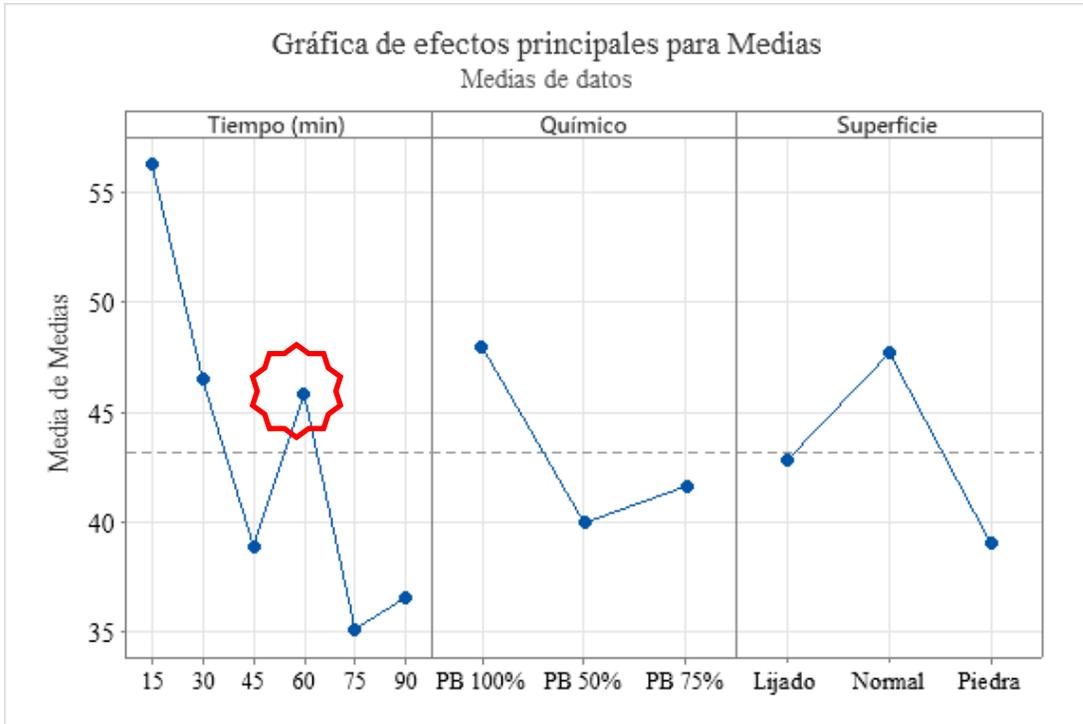


Figura 67: Resistencia a la corrosión en el acero según los factores del pavonado químico por separado

Tabla 26: Agrupación del factor tiempo según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con respuesta en manchas de corrosión

Tiempo (min)	N	Media	Agrupación
15	3	56,22	A
30	3	46,44	A B
60	3	45,78	A B
45	3	38,89	B
90	3	36,56	B
75	3	35,11	B

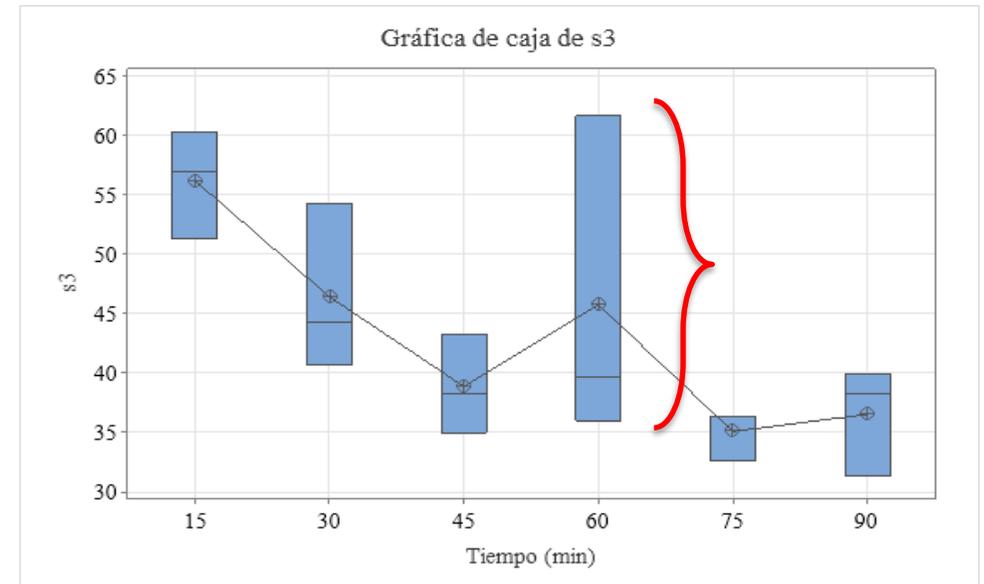


Figura 68: Representación de caja para las manchas de corrosión en el pavonado químico en relación con la temperatura

Resistencia a la Corrosión – pavonado químico

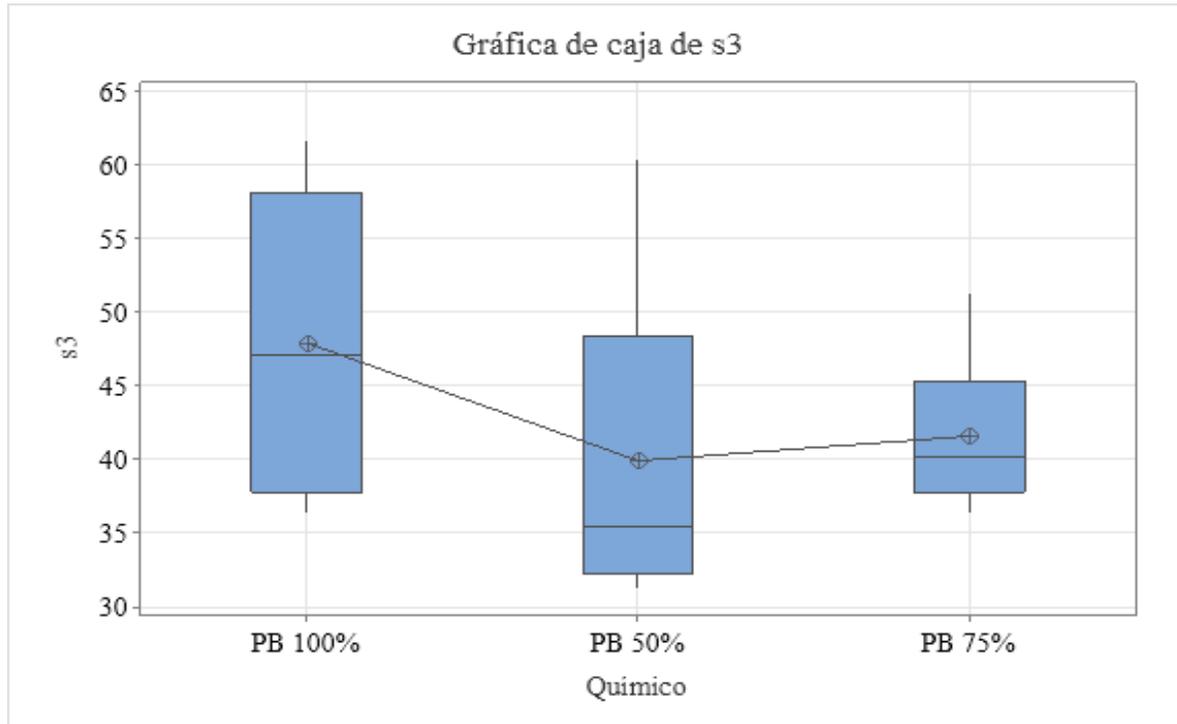


Figura 69: Representación de caja para las manchas de corrosión en el pavonado químico en relación con la concentración de químico



Figura 70: Probeta completamente oxidada al no limpiar el agente químico después de aplicar el pavonado

Resistencia a la Corrosión – pavonado químico

Tabla 27: Datos más significativos de la interacción entre factores del pavonado químico para la resistencia a la corrosión

	Tiempo	Químico	Superficie	Manchas
Max	60	PB 100%	Normal	61,667
Min	90	PB 50%	Piedra	31,333

Gráfica de interacción para s3 Medias de datos

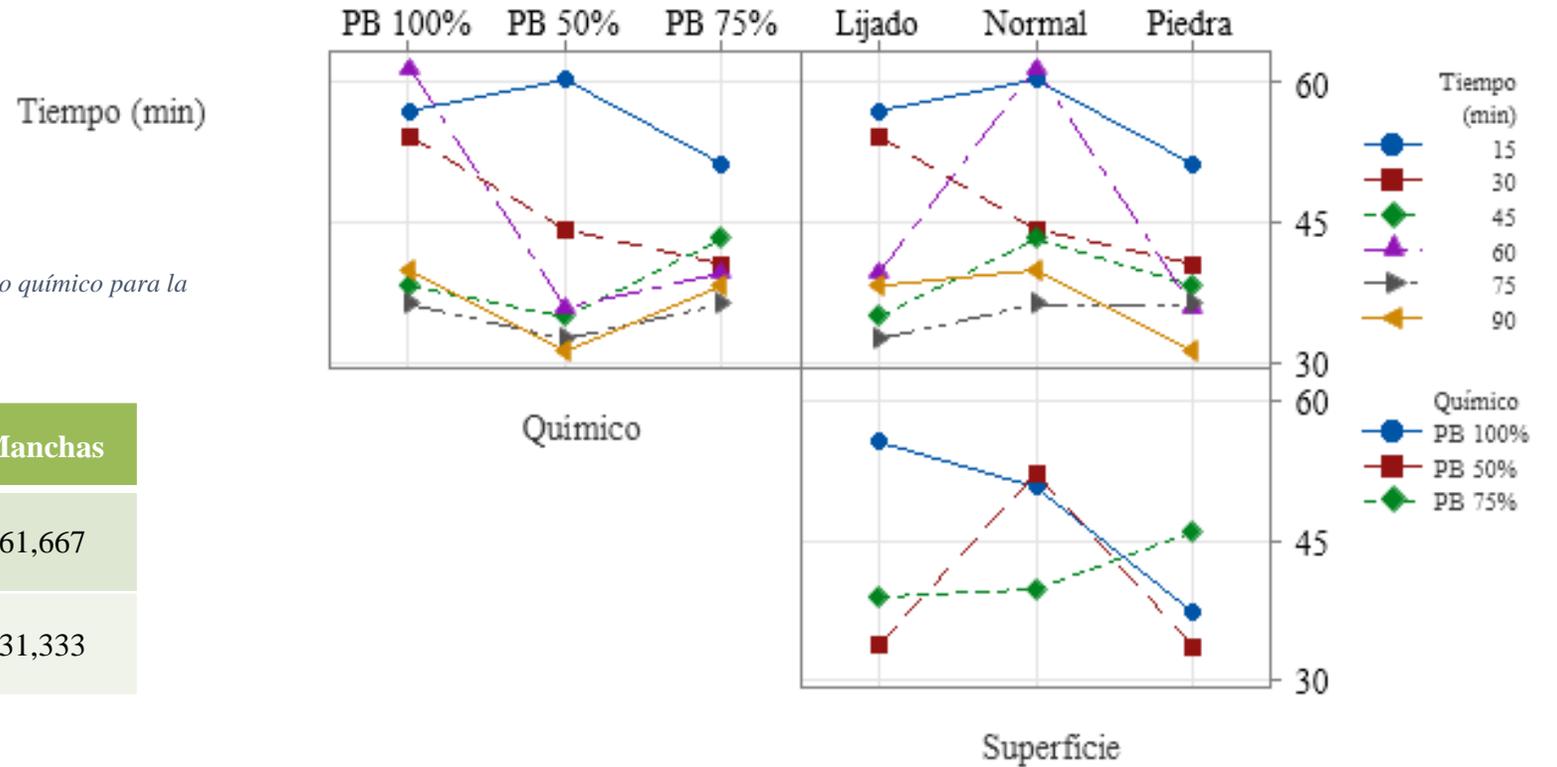
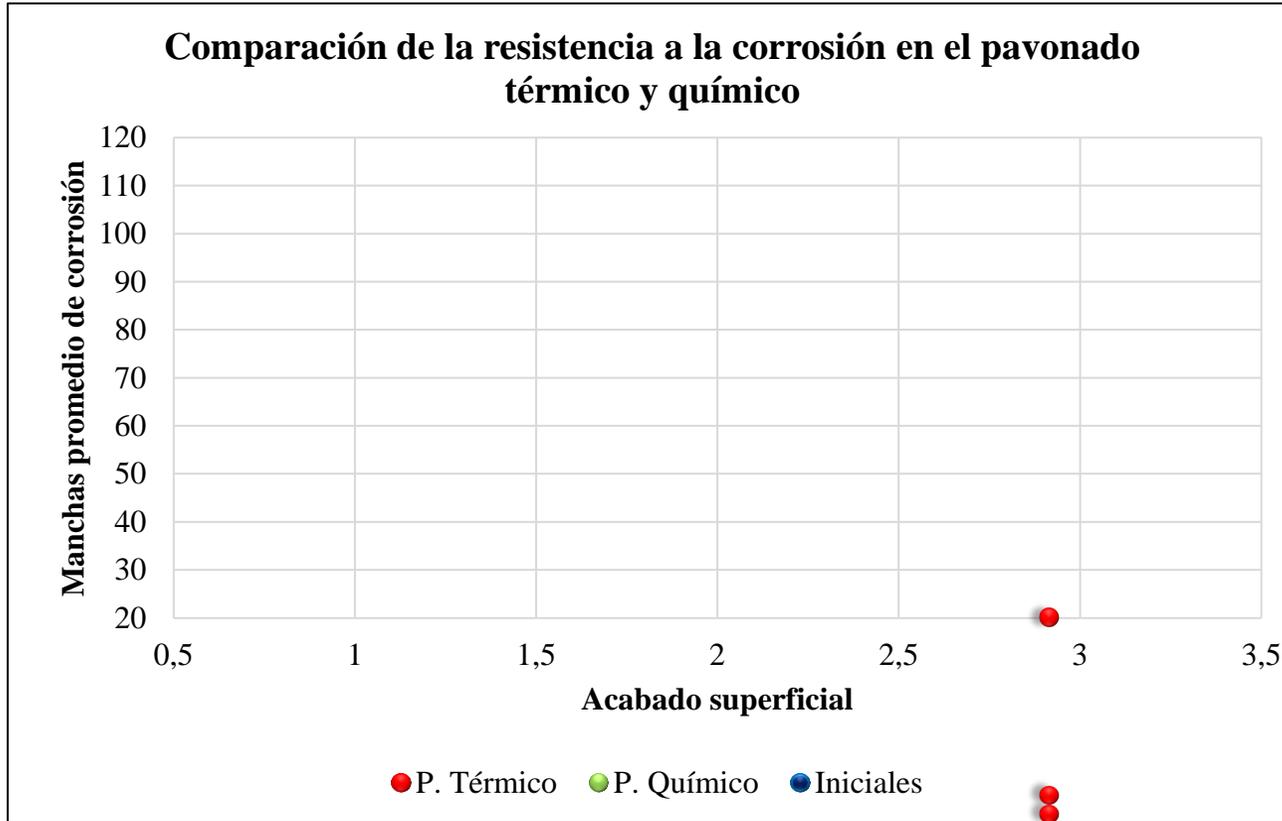


Figura 71: Interacción de factores del pavonado químico con resultados de resistencia a la corrosión para la última inmersión

Comparación de la resistencia a la corrosión obtenidas en ambos procesos

Figura 72: Distribución de las medias de manchas de corrosión del pavonado térmico y químico en base al acabado superficial



Nota 2: El valor 1 corresponde al acabado superficial lijado, el valor 2 corresponde al acabado superficial normal y el valor 3 corresponde al acabado superficial de piedra

El pavonado térmico solo adquiere propiedades de resistencia a la corrosión cuando se trabaja a temperaturas altas, en cambio el pavonado químico si adquiere mejores propiedades de resistencia en varias de sus combinaciones.

Determinación del mejor proceso de pavonado

Tabla 28: Mejor y peor resultado de resistencia a la corrosión para los procesos de pavonado

RC	Pavonado					Consecuencias		
	Proceso	Variable	Fluido	Superficie	RC /Grado	Dureza	Rugosidad	Color
El mejor	P. Químico	90 min	PB 50%	Piedra	3	3,34%	78,49%	Negro
El peor	P. Térmico	330°C	A. Quemado	Lijado	1	2,29%	-20,48%	Verde azulado

Tabla 29: Resultados destacables de la dureza para los procesos de pavonado

HBR	Pavonado					Consecuencias		
	Proceso	Variable	Fluido	Superficie	RC /Grado	Dureza	Rugosidad	Color
El máximo	P. Químico	45 min	PB 75%	Normal	3	9,54%	-59,29%	Café Oscuro
El mínimo	P. Térmico	390°C	A. Quemado	Lijado	2	-2,67%	-0,15%	Violeta Oscuro
Cercanos al V.I.	P. Químico	45min	PB 50%	Lijado	3	0,39%	27,35%	Negro
		270	20w50	Piedra	2	0%	25,815	Azul marino
	P. Térmico	330	10w40	Piedra	2	0%	74,31%	Café Anaranjado
		360	20w50	Lijado	2	0%	-47,77%	Gris azulado



Determinación del mejor proceso de pavonado

Tabla 30: Resultados destacados de rugosidad para los dos procesos de pavonado

Rugosidad	Pavonado					Consecuencias		
	Proceso	Variable	Fluido	Superficie	RC /Grado	Dureza	Rugosidad	Color
El máximo	P. Químico	75 min	PB 75%	Normal	3	4,58%	0,48%	Café Oscuro
El mínimo	P. Térmico	270	10w30	Lijado	2	-3,82%	-77,94%	Azul Verdoso
óptimo	P. Químico	75 min	PB 75%	Normal	3	4,58%	0,48%	Café Oscuro
	P. Térmico	390°C	A. Quemado	Lijado	2	-2,67%	-0,15%	Violeta Oscuro

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El tratamiento superficial pavonado brinda al acero un aumento a la resistencia a la corrosión cuando sus variables de control se encuentran en los valores adecuados de trabajo.

la mejor combinación para que el acero resista a la corrosión es la del pavonado químico cuando se tiene un tiempo de sumersión de 90 min y una concentración de agente químico del 50% cuando el acero tiene un acabado superficial de piedra de rectificar

El acabado superficial normal es uno de los factores que más afecta a la propagación de la corrosión

Conclusiones

El pavonado térmico presenta una propagación de la corrosión cuando se trabaja con temperaturas inferiores a 390°C

El pavonado altera en una enorme proporción a la rugosidad del acero

Recomendaciones

- Para el presente trabajo se trabajó con un solo tipo de acero, el cual fue AISI 1018, utilizado con el propósito de generar una corrosión controlada. Para futuros trabajos es recomendable trabajar con diferentes tipos de aceros.
- Para futuros trabajos se recomienda analizar el comportamiento del pavonado térmico en temperaturas superiores a los 400°C hasta determinar en qué temperatura el tamaño de grano no es alterado.
- Estudiar el comportamiento del pavonado en superficies que no sean cilíndricas.
- Establecer una zona de trabajo adecuada y asegurarse de que los factores ambientales no afecten al proceso de pavonado

GRACIAS POR SU ATENCIÓN



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Webgrafía

Amat, J. (enero de 2016). *Cienciadedatos.com*. Obtenido de ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias: https://www.cienciadedatos.net/documentos/19_anova

Curiosoando. (25 de julio de 2018). *Curiosoando.com*. Obtenido de ¿Qué es un aceite mineral?: <https://curiosoando.com/que-es-un-aceite-mineral>

Infinitia. (28 de julio de 2020). *Infinitiasearch.com*. Obtenido de Ensayos de corrosión. ¿Qué son y cuándo realizarlos?: <https://www.infinitiaresarch.com/noticias/ensayos-de-corrosion-que-son-y-cuando-realizarlos/>

IQR. (19 de febrero de 2021). *Ingenieriaquimicareviews.com*. Obtenido de ¿Qué es el pavonado?: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/02/pavonado-que-es.html>

Levinson. (Febrero de 2020). *Levinson.com*. Obtenido de Influencia del Grano en el Acero: <https://www.aceroslevinson.com/2020/02/influencia-del-grano-en-el-acero/>

Noria. (21 de noviembre de 2021). *Noria.mx*. Obtenido de Etendiendo los grados de viscosidad SAE para lubricantes del motor: <https://noria.mx/lublearn/entendiendo-los-grados-de-viscosidad-sae-para-lubricantes-de-motor/>

NRAFAMILY. (11 de febrero de 2020). *nrafamily.org*. Obtenido de Fabricación de armas: Browning vs Bluing: <https://www.nrafamily.org/articles/2020/2/11/gun-manufacturing-browning-vs-bluing>

Bibliografía

- AHMSA. (2019). *Normas y características a las que se sujetan los Aceros Fabricados por Altos Hornos de México*. www.ahmsa.com
- ASM, I. (2000). Corrosion: Understanding the Basic. In D. J, R (Ed.), *www.asminternacional.org* (Vol. 21, Issue 10). <https://doi.org/10.4324/9781003266532-2>
- Callister, W. (1995). *Introducción a la Ciencia de los materiales* (Primera). Editorial Reverté.
- Campoverde, A., Acuña, D., & Vizuete, K. (2022). *Informe de Resultados Perfilómetro*.
- Casado de Diego, Á. (2014). *Estudio Químico de Aceites Lubricantes Marinos*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Bilbao.
- Dagnino, J. (2014). *Análisis de Varianza*. <https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf>
- Font Pérez, R. J. (1991). *Pavonado: Evaluación del Proceso y Resistencia a la Corrosión*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- INEN. (1984). *Norma 1176: Recubrimientos Metálicos. Determinación de la Resistencia a la Corrosión. Evaluación de Resultados para ensayos de Corrosión Acelerada* (No. 1176). <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1176.pdf>
- INEN. (2013). *Norma: 1190:2013 Recubrimientos Metálicos. Determinación de la Resistencia a la Corrosión. Ensayo de Inmersión Alternada* (1190:2013). <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1190.pdf>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (L. M. Cruz, Ed.; Quinta). PEARSON EDUCACIÓN. www.pearsoneducacion.net/kalpakjian
- Llorenç Carbonell Domenech. (2014). *Proceso de Pavonado contra la corrosión para aceros, hierro y fundición: optimización de los parámetros para mejorar dicho proceso*.
- Montgomery, D. C. (2003). *Diseño y análisis de experimentos* (Segunda). Limusa Wiley.
- Morales, T., Jiménez, J. L., Casado, E., Navarro, J., & Gracia, J. (2013). *Protección de superficies* (Primera). Ediciones Paraninfo.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos* (P. Guerrero, Ed.; Sexta). Pearson Educación.
- Pérez Jerez, A. (2015). *Estudio de los tratamientos de conversión química de pavonado sellado con cerio en acero al carbono AISI 1018*. Instituto Politécnico Nacional.
- R.H. Angier. (1936). *Firearm Blueing and Browning* (N. Schwing, Ed.; First). STACKPOLE BOOKS.
- Schey, J. A., León Cárdenas, J., & Pedroza Montes de O., J. C. (2002). *Procesos de manufactura* (Tercera). McGraw-Hill.
- Smith, W. F. (William F., Hashemi, Javad., Nagore Cázares, Gabriel., & González-Caver, P. Alejandro. (2006). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales* (Cuarta). MCGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. DE C.V.
- Tanco, M., Viles, E., & Pozueta, L. (2009). Diferentes Enfoques del Diseño de Experimentos. In *Advances in Electrical Engineering and Computational Science* (pp. 611–622). Springer .
- Tauber, J. (2019). *Bluing Steel: An Investigation into the Thermal and Chemical Methods of Colouring Mild Steel*.
- Wagner, W. D., Dobrogorski, O. J., Stokinger, H., Shoshkes, M., Banfield, W. G., Rosenbaum, S. J., & Fisk, A. (2009). Documentación Toxicológica para el establecimiento del límite de exposición profesional del aceite mineral refinado, neiblas. In *A.MA Arch. Ind. Hyg. Occup. Med* (Vol. 33). Poly-nuclear Aromatic Compounds.