



**Estudio de la resistencia a la corrosión dada por las diferentes técnicas de aplicación
del tratamiento superficial pavonado**

Padilla Mosquera, Ronnie Alejandro

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Sánchez Sánchez, Xavier Rolando

9 de agosto del 2022



Tesis_Pavonado_Revisión.pdf

Scanned on: 13:22 August 17, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text



Firmado electrónicamente por:
XAVIER ROLANDO
SANCHEZ SANCHEZ

Identical Words	81
Words with Minor Changes	9
Paraphrased Words	0
Omitted Words	0



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, **“Estudio de la resistencia a la corrosión dada por las diferentes técnicas de aplicación del tratamiento superficial pavonado”** fue realizado por el señor Padilla Mosquera, Ronnie Alejandro el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente

Sangolquí, 9 de agosto del 2022



Firmado electrónicamente por:
XAVIER ROLANDO
SANCHEZ SANCHEZ

Ing. Sánchez Sánchez, Xavier Rolando PhD

C.C.: 1712575826



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Responsabilidad de Autoría

Yo, Padilla Mosquera, Ronnie Alejandro, con cédula de ciudadanía N.º 1718546557, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Estudio de la resistencia a la corrosión dada por las diferentes técnicas de aplicación del tratamiento superficial pavonado**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 9 de agosto del 2022

Padilla Mosquera Ronnie Alejandro

C.C.: 1718546557



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Autorización de Publicación

Yo, Padilla Mosquera, Ronnie Alejandro, con cédula de ciudadanía N.º 1718546557, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"Estudio de la resistencia a la corrosión dada por las diferentes técnicas de aplicación del tratamiento superficial pavonado"** en el Repositorio, cuyo contenido, ideas y criterios es de mi responsabilidad.

Sangolquí, 9 de agosto del 2022

Padilla Mosquera Ronnie Alejandro

C.C.: 1718546557

Dedicatoria

A toda mi familia que me ha apoyado y motivado a seguir adelante en toda la carrera.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por darme la fuerza para seguir adelante con todo lo que me propongo.

A mi madre por estar siempre a mi lado en cada día que estuve en la universidad y que a pesar de las adversidades nunca se rindió en la vida.

A mi padre por estar siempre pendiente de mí y cuidarme en cada momento de mi vida.

A mis abuelos por todo el cariño y protección que me dan y la sabiduría transmitida en todos estos años.

A toda mi familia que, aunque no lo sepan contribuyeron en gran parte a la realización de este trabajo.

A todos los amigos y compañeros que me apoyaron en la carrera y en la realización de este trabajo, y por no dejarme rendir en los momentos difíciles de las clases.

Contenido

Índice de Tablas	12
Índice de Figuras.....	15
Resumen	20
Abstract	21
Capítulo I Generalidades	22
Introducción.....	22
Justificación e Importancia.....	23
Antecedentes.....	23
Alcance.....	25
Objetivos.....	26
Objetivo General	26
Objetivos específicos	26
Capitulo II Estado del Arte	27
Corrosión	27
Oxidación del Acero	27
Procesos de protección superficial	28
Pavonado	29
Pavonado En Caliente (Térmico).....	30
Aceites industriales	30
Aceites minerales.....	31
Aceites sintéticos.....	31
Pavonado en Frío (Químico).....	32
Limpieza superficial.....	33

Ensayos de corrosión acelerada.....	33
Ensayo de inmersión Alternada y norma INEN 1190.....	33
Determinación de la Resistencia a la Corrosión.....	34
Norma INEN 1176	34
Propiedades mecánicas del Acero	35
Resistencia a la deformación.....	36
Determinación del tamaño de grano.....	36
Dureza y ensayos de dureza	37
Acabado superficial.....	38
Diseño del Experimento	40
Enfoque de Taguchi	41
Análisis ANOVA	42
Capitulo III Metodología	43
Diseño del experimento y selección de variables	43
Selección de parámetros para el pavonado	43
Diseño de Taguchi	44
Preparación de las probetas de ensayo	45
Mecanizado	45
Limpieza	47
Pavonado Térmico	49
Post limpieza y codificado de las probetas de pavonado térmico	51
Procedimiento del pavonado térmico	52
Pavonado Químico.....	54

	10
Preparación de las probetas y de la zona de trabajo	54
Procedimiento del pavonado químico.....	56
Ensayo de Dureza.....	59
Observación de la micrografía	61
Medición de la rugosidad	63
Resistencia a la corrosión	65
Capitulo IV Análisis de Datos.....	69
Control del proceso de pavonado térmico y químico	69
Resultados de la Micrografía	70
Resultados del ensayo de Dureza	73
Dureza del pavonado térmico	73
Dureza del pavonado químico	78
Comparación de durezas obtenidas en ambos procesos	85
Rugosidad	86
Rugosidad del pavonado térmico	87
Rugosidad del pavonado químico.....	93
Comparación de rugosidad obtenido en ambos procesos.....	99
Resistencia a la Corrosión	101
Resistencia a la corrosión del pavonado térmico	102
Resistencia a la corrosión del pavonado químico	110
Comparación de la resistencia a la corrosión obtenidas en ambos procesos.....	119
Determinación del mejor proceso de pavonado	120
Análisis de costos.....	122

Costos directos.....	122
Costos indirectos.....	123
Capítulo V Conclusiones y Recomendaciones.....	125
Conclusiones.....	125
Recomendaciones.....	127
Bibliografía.....	128
Webgrafía.....	128
Bibliografía.....	129

Índice de Tablas

Tabla 1: Porcentaje de superficie corroída de las probetas de acero después de la aplicación del proceso de pavonado.....	25
Tabla 2: Valores de viscosidad de distintos aceites según la clasificación SAE.....	32
Tabla 3: Frecuencias e índices que categorizan a la cantidad de oxidación presente en las piezas de metal según INEN	35
Tabla 4: Combinaciones necesarias de ensayos para el análisis del pavonado térmico	44
Tabla 5: Combinaciones necesarias de ensayos para el análisis del pavonado químico	55
Tabla 6: Valores de dureza inicial del acero analizado.....	61
Tabla 7: Datos obtenidos del análisis del tamaño de grano para 2 probetas del pavonado térmico.....	71
Tabla 8: Agrupación del factor temperatura según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con respuesta de dureza	76
Tabla 9: Agrupación del factor superficie según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con respuesta de dureza.....	77
Tabla 10: Datos más significativos de la interacción entre factores del pavonado térmico ..	78
Tabla 11: Agrupación del factor tiempo según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con resultado de dureza.....	81
Tabla 12: Agrupación del factor químico según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con resultado de dureza.....	83
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	83
Tabla 14: Datos más significativos de la interacción entre factores del pavonado químico .	85
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.....	91
Tabla 16: Datos más significativos de rugosidad en la interacción entre factores del pavonado térmico.....	93

Tabla 17: Agrupación del factor tiempo según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con resultado de rugosidad.....	97
Tabla 18: Datos más significativos de la interacción entre factores del pavonado químico en cuanto a rugosidad.....	99
Tabla 19: Valores del promedio de manchas de corrosión en las probetas sin aplicar ningún pavonado.....	104
Tabla 20: Valores del promedio de manchas de corrosión en las probetas de pavonado térmico.....	104
Tabla 21: Porcentaje de crecimiento y propagación de la corrosión en las probetas de pavonado térmico.....	105
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.....	108
Tabla 23: Datos más significativos de la interacción entre factores del pavonado térmico para la resistencia a la corrosión	110
Tabla 24: Valores del promedio de manchas de corrosión en las probetas de pavonado químico.....	111
Tabla 25: Porcentaje de crecimiento y propagación de la corrosión en las probetas de pavonado químico.....	113
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.....	115
Tabla 27: Datos más significativos de la interacción entre factores del pavonado químico para la resistencia a la corrosión	118
Tabla 28: Mejor y peor resultado de resistencia a la corrosión para los procesos de pavonado.....	121
Tabla 29: Resultados destacables de la dureza para los procesos de pavonado	121
Tabla 30: Resultados destacados de rugosidad para los dos procesos de pavonado	121
Tabla 31: Costos directos del proyecto	122
Tabla 32: Costos indirectos del proyecto	123

Tabla 33: Honorarios de Docentes y Estudiantes que intervinieron en el proyecto	123
Tabla 34: Costo del uso de equipos de laboratorio para el proyecto	124
Tabla 35: Tabla Resumen de Costos	124

Índice de Figuras

Figura 1: Formación porosa de óxido formado por la interacción del acero y el oxígeno del aire.....	28
Figura 2: Diferentes tipos de protección superficial	29
Figura 3: Representación de la capa de óxido formada por el pavonado	30
Figura 4: Diferentes tamaños de grano catalogados según la ASTM	37
Figura 5: Principales diferencias entre los diferentes sistemas de dureza.....	38
Figura 6: Topografía de una superficie de un material aleatorio	39
Figura 7: Clasificación ISO de la rugosidad y acabado superficial para los distintos procesos de manufactura	40
Figura 8: Máquinas herramientas utilizadas para el mecanizado de las probetas.....	46
Figura 9: Probetas de ensayo con acabado superficial tipo pulido dado por lija y piedra de rectificar	46
Figura 10: Probetas mecanizadas en la fresadora.....	47
Figura 11: Útiles de limpieza para las probetas	48
Figura 12: Probetas con acabado superficial del tipo "lijado" almacenadas en aceite 20w-50	49
Figura 13: Proceso de mecanizado y almacenamiento	49
Figura 14: Hornos utilizados para el pavonado térmico.....	50
Figura 15: Encerado de Temperatura del horno Wild Barfield.....	51
Figura 16: Primeras tres probetas de pavonado con su código respectivo: A1	51
Figura 17: Recipientes llenos de aceite para pavonar	52
Figura 18: Distintas tonalidades del acero obtenidas mediante el proceso de pavonado térmico con distintas temperaturas y aceites	53
Figura 19: Proceso del pavonado térmico.....	54
Figura 20: Zona de trabajo establecida para el pavonado químico.....	56
Figura 21: Galón de agente químico PavonBlack	57
Figura 22: Verificación de la temperatura con un termómetro de mercurio	57

Figura 23: Distintas tonalidades de tono oscuro del acero obtenidas mediante el proceso de pavonado químico con distintos tiempos de sumersión y cantidad de agente químico.....	58
Figura 24: Proceso del pavonado químico	59
Figura 25: Durómetro Rams Rockford.....	60
Figura 26: Calibración del durómetro con el patrón HBR 88	60
Figura 27: Mesa para lijar manual y lijas utilizadas para la preparación metalográfica	62
Figura 28: Microestructura de las probetas de acero sin realizar ningún tipo de pavonado	62
Figura 29: Perfilómetro Bruker, modelo Dektak XT, usado para medir la rugosidad en las probetas pavonadas.....	64
Figura 30: Probeta preparada para analizar rugosidad	64
Figura 31: Elementos principales de la solución salina	65
Figura 32: Control de la cantidad de las partes de NaCl y agua	66
Figura 33: Zona de trabajo de la prueba de resistencia a la corrosión.....	66
Figura 34: Conteo de las manchas de corrosión en una probeta sin pavonar	67
Figura 35: Representación gráfica de los colores obtenidos en el proceso de pavonado térmico.....	69
Figura 36: Representación gráfica de los colores obtenidos en el proceso de pavonado químico	70
Figura 37: Análisis del tamaño de grano por el método de intersección.....	71
Figura 38: Micrografía de las probetas A15 y A17 después de ser aplicadas el pavonado térmico.....	72
Figura 39: Comportamiento de la dureza superficial de las probetas después de ser aplicado el pavonado térmico.....	73
Figura 40: Crecimiento y decrecimiento de la dureza en el pavonado térmico.....	74
Figura 41: Comportamiento de la dureza en el acero según los factores del pavonado térmico por separado	75
Figura 42: Representación de caja de la dureza en el pavonado térmico en relación a la temperatura	76

Figura 43: Representación de caja de la dureza en el pavonado térmico en relación al acabado superficial	77
Figura 44: Interacción de factores del pavonado térmico con resultados de dureza	78
Figura 45: Comportamiento de la dureza superficial de las probetas después de ser aplicado el pavonado químico	79
Figura 46: Crecimiento de la dureza en el pavonado químico.....	80
Figura 47: Comportamiento de la dureza en el acero según los factores del pavonado térmico por separado	81
Figura 48: Representación de caja de la dureza en el pavonado químico en relación al tiempo de sumersión.....	82
Figura 49: Representación de caja de la dureza en el pavonado químico en relación al acabado superficial	84
Figura 50: Interacción de factores del pavonado químico con resultados de dureza	85
Figura 51: Distribución de las medias de dureza del pavonado térmico y químico en base al acabado superficial	86
Figura 52: Comportamiento de rugosidad de las probetas después de ser aplicado el pavonado térmico.....	88
Figura 53: Comparación gráfica de la variación de rugosidad con respecto a su valor inicial en el pavonado térmico.....	89
Figura 54: Crecimiento y decrecimiento de rugosidad en el pavonado térmico.....	89
Figura 55: Comportamiento de la rugosidad en el acero según los factores del pavonado térmico por separado	90
Figura 56: Representación de caja de la rugosidad en el pavonado térmico en relación a la temperatura	91
Figura 57: Representación de caja de la rugosidad en el pavonado térmico en relación al aceite usado	92
Figura 58: Interacción de factores del pavonado térmico con resultados de rugosidad	93

Figura 59: Comportamiento de la rugosidad de las probetas después de ser aplicado el pavonado químico	94
Figura 60: Comparación gráfica de la variación de rugosidad con respecto a su valor inicial en el pavonado químico	95
Figura 61: Crecimiento y decrecimiento de la rugosidad en el pavonado químico	95
Figura 62: Comportamiento de la rugosidad en el acero según los factores del pavonado químico por separado	96
Figura 63: Gráfica de caja de la rugosidad en el pavonado químico en relación al tiempo de sumersión	97
Figura 64: Gráfica de caja de la rugosidad en el pavonado químico en relación a la concentración del agente químico	98
Figura 65: Interacción de factores del pavonado químico con resultados de rugosidad	99
Figura 66: Distribución de las medias de rugosidad del pavonado térmico y químico en base al acabado superficial	100
Figura 67: Manchas de corrosión presentes en las probetas de pavonado térmico con acabado superficial normal	101
Figura 68: Manchas de corrosión presentes en las probetas de pavonado químico con acabado superficial normal	102
Figura 69: Probetas oxidadas después del ensayo de inmersión alternada	102
Figura 70: Número de manchas promedio obtenido en la tercera sumersión para las probetas de pavonado térmico.....	103
Figura 71: Tasa de crecimiento de la corrosión en el pavonado térmico con sus distintas variaciones	106
Figura 72: Resistencia a la corrosión en el acero según los factores del pavonado térmico por separado.....	107
Figura 73: Representación de caja para las manchas de corrosión en el pavonado térmico en relación con la temperatura.....	108

Figura 74: Representación de caja para las manchas de corrosión en el pavonado térmico en relación con el aceite	109
Figura 75: Interacción de factores del pavonado térmico con resultados de resistencia a la corrosión para la última sumersión.....	110
Figura 76: Número de manchas promedio obtenido en la tercera sumersión para las probetas de pavonado químico.....	112
Figura 77: Tasa de crecimiento de la corrosión en el pavonado químico con sus distintas variaciones	114
Figura 78: Resistencia a la corrosión en el acero según los factores del pavonado químico por separado	115
Figura 79: Representación de caja para las manchas de corrosión en el pavonado químico en relación con la temperatura	116
Figura 80: Representación de caja para las manchas de corrosión en el pavonado químico en relación con la concentración de químico	117
Figura 81: Probeta completamente oxidada al no limpiar el agente químico después de aplicar el pavonado.....	117
Figura 82: Interacción de factores del pavonado químico con resultados de resistencia a la corrosión para la última sumersión.....	118
Figura 83: Distribución de las medias de manchas de corrosión del pavonado térmico y químico en base al acabado superficial.....	119

Resumen

En el presente trabajo de investigación se detalla todo el procedimiento realizado que llevó a determinar la resistencia a la corrosión que aporta el tratamiento superficial pavonado en un acero AISI 1018. Adicional a esto se realizaron ensayo de dureza y rugosidad para determinar si el proceso de pavonado interviene en el cambio de estas dos propiedades, y un estudio de tamaño de grano en probetas con tratamiento térmico.

Para establecer una metodología estandarizada en cuanto al análisis de resistencia a la corrosión se dio uso de las normas INEN 1176 y 1190, las cuales sirven para crear una solución salina corrosiva que genera una capa de óxido en la superficie del acero y para determinar el nivel de resistencia a la corrosión que obtiene el acero después de ser aplicado un tratamiento de pavonado.

Para poder realizar los ensayos de esta investigación se utilizó equipos de varios laboratorios: como los hornos de alta y baja potencia del laboratorio de Ciencia de Materiales, un durómetro Rockwell B del Laboratorio de Mecánica de Materiales y un perfilómetro para medir rugosidad del Laboratorio de Caracterización de Nanomateriales, los cuales se encuentran distribuidos en el campus de la universidad. Mientras que para el ensayo de resistencia a la corrosión se utilizaron 4 soportes que fueron construidos en el Laboratorio de Manufactura.

Palabras clave: Pavonado, dureza, rugosidad

Abstract

In the present research work, the entire procedure carried out that led to determining the corrosion resistance provided by the blued surface treatment in an AISI 1018 steel is detailed. In addition to this, hardness and roughness tests were carried out to determine if the bluing process intervenes in the change of these two properties. and a study of grain size in specimens with heat treatment.

To establish a standardized methodology in terms of corrosion resistance analysis, the INEN 1176 and 1190 standards were used. which serve to create a corrosive saline solution that generates a layer of oxide on the surface of the steel, and to determine the level of resistance to corrosion that the steel obtains after being applied a blued treatment.

In order to carry out the tests of this research, equipment from several laboratories was used: such as the high and low power furnaces in the Materials Science laboratory, a Rockwell B hardness tester from the Mechanics of Materials Laboratory Materials and a profilometer to measure roughness of the Nanomaterials Characterization Laboratory, which are distributed on the university campus. While for the corrosion resistance test, 4 support structures were built in the Manufacturing Laboratory were used.

Keywords: Blued, hardness, rugosity

Capítulo I Generalidades

Introducción

El tratamiento superficial del pavonado es un proceso aplicado a la superficie de los elementos metálicos de acero, para brindarle una mayor resistencia a la corrosión y evitar así su oxidación en el tiempo de vida útil de la pieza. Se lo logra a través de la formación controlada de una capa de óxido negro de hierro (Fe_3O_4) mediante un calentamiento del metal o un ataque químico y posteriormente sumergiéndolo en una base de aceite (Llorenç Carbonell Domenech, 2014).

La capa de óxido protectora del acero se la puede conseguir mediante dos procesos de pavonado: térmico (en caliente) y químico (en frío), los cuales se van a describir en detalle más adelante. Además, esta capa se la puede obtener en cualquier tipo de acero y en cualquier geometría que la pieza posea, debido a que en todo el proceso la pieza de trabajo se sumerge completamente en aceite o en un agente químico.

Al ser un procedimiento bastante fácil y rápido de aplicar, el pavonado se usa en: la industria metalúrgica para cubrir piezas cuyo destino es trabajar con sustancias corrosivas, en la cobertura de piezas de metal de las armas con un fin estético, la protección de piezas restauradas para prolongar y su vida útil, piezas específicas en la industria petrolera, piezas decorativas, etc. (IQR, 2021)

La metodología para este proyecto es medir la resistencia a la corrosión que el acero obtiene cuando se le aplica el tratamiento superficial pavonado, aplicando dos técnicas conocidas de pavonado en función de su variable principal (tiempo y temperatura) y en adición a esto se desea medir la dureza superficial y rugosidad de las probetas antes y después de aplicar dichos tratamientos para determinar si existe algún cambio representativo.

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.

El pavonado es un proceso empleado en la industria metalmeccánica en todo el mundo debido a que es un proceso de implementación rápida y económica que ayuda a contrarrestar la corrosión. Pero en algunos casos, especialmente en el pavonado térmico, no se tiene una metodología técnica y la mayoría de los procesos efectuados en las pequeñas y medianas empresas de metalurgia se usa el conocimiento empírico para realizar un pavonado.

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.

Antecedentes

El pavonado es uno de los procesos anticorrosivos más antiguos de la historia, no se sabe con exactitud la época en la que se originó, pero se ha venido usando para prolongar la vida de las herramientas y piezas de acero ante una contaminación oxidante. Una de las primeras aplicaciones industriales conocidas fue durante el siglo XVIII, en donde la militarizada de Inglaterra ya tenía métodos de recubrimiento por medio de calentamiento de metales e interacción con agentes químicos. (R.H. Angier, 1936)

Los problemas de la corrosión, oxidación y contaminación son eventos que no se pueden evitar ya que son producto de la interacción de la naturaleza con el trabajo del hombre. Pero para tolerar dichas imperfecciones se ha creado una serie de normativas que

dan una pauta del nivel de corrosión admisible que puede tener una pieza de trabajo en su superficie, evitando así que no se produzca daños en su tiempo de vida útil.

En nuestro país el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) ha generado su propia serie de normas basadas en las normas ASTM, de las cuales las más relevantes para el presente trabajo son: la norma INEN 1190 que presenta el ensayo de corrosión acelerada por medio de inmersión alternada y la norma INEN 1176 que presenta el método de conteo y calificación de la corrosión total impregnada en una pieza.

A lo largo de los años se ha expandido el tema de investigación del pavonado, especialmente del pavonado por sumersión en químicos oxidantes cuyos agentes más comunes son el hidróxido de sodio ($NaOH$) y nitrato de sodio (NO_3Na). (Pérez Jerez, 2015) ha investigado acerca de la “calidad” del pavonado químico en referente a su tiempo de aplicación, los elementos y propiedades químicas que posee la capa de oxidación, la impregnación de la capa de óxido y la resistencia a la corrosión. Las investigaciones realizadas en el mundo se han enfocado en el pavonado químico debido a que es un proceso más rentable energéticamente hablando que el pavonado térmico (en caliente).

De igual forma (Font Pérez, 1991) ha estudiado el comportamiento del acero frente a la corrosión al aplicar una combinación de los procedimientos del pavonado térmico con el pavonado químico, en los cuales se destaca una combinación de: calentamiento de la probeta a $550^{\circ}C$, aplicación del aceite SAE 30 después de que la probeta se enfríe y una sumersión en el agente químico ($NaOH$ y KNO_3) cuyos resultados se pueden observar en la tabla 1.

Tabla 1:

Porcentaje de superficie corroída de las probetas de acero después de la aplicación del proceso de pavonado

IMPREGNACIÓN POSTERIOR ACEITE SAE 30					
Tiempo de inmersión (min)	HORAS EN NIEBLA SALINA				
	1	2	3	4	5
2	-	1%	10%	16%	30%
4	-	-	1%	6%	10%
6	-	-	-	3%	5%
8	-	-	-	2%	3%
10	-	-	-	1%	2%

Nota: Extracto de la tabla: X1 pavonado a 550°C – Inmersión en KNO_3 -NaOH Fuente: (Font Pérez, 1991)

Entre los factores que pueden influir en el resultado final del pavonado está el control de sus variables, como se observa en la tabla 1, la variable de control en este caso es el tiempo de inmersión y tiempo en la cámara de niebla. Sin embargo, uno de los factores que más influye en el resultado final es el acabado superficial de la pieza. Ya que según (Tauber, 2019) las diferentes técnicas de limpieza provocan varias superficies en las probetas.

La información encontrada acerca del pavonado térmico es escasa y hace referencia a su rango de aplicación, siendo entre 200°C y 300°C, (Font Pérez, 1991) recomienda un estudio cuyo rango de temperatura sea menor a 150°C y no superior a 500°C debido a que el óxido obtenido después de dicha temperatura es perjudicial para la pieza (FeO). La información divulgada también se refiere a que en este proceso se puede aplicar prácticamente cualquier tipo de aceite: minerales, sintéticos e incluso orgánicos.

Alcance

En esta investigación se establece las diferencias más destacables de los resultados de la aplicación de los dos tipos de tratamientos superficiales del pavonado en contra de la corrosión, un análisis al cambio de la dureza superficial en el material y posibles cambios en la rugosidad de los acabados superficiales, aplicándose en un solo tipo de acero el cual es AISI 1018.

Se establece un proceso técnico adecuado para la aplicación del pavonado térmico y una explicación de las distintas coloraciones que adquiere la superficie del acero cuando se le aplica dicho tratamiento cuando se varía la temperatura de calentamiento y la base de aceite.

Se aplica las normas INEN 1176 y 1190 para poder clasificar los resultados obtenidos y establecer el manejo más adecuado de las variables de los dos tipos de pavonados.

Objetivos

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.

Capítulo II Estado del Arte

Corrosión

La corrosión es un término utilizado para definir la reacción química o electroquímica entre 2 materiales, generalmente metales y el ambiente, que hace que se genere un deterioro en el metal y hace que pierda parte de sus propiedades mecánicas. (ASM, 2000)

Para poder describir la capacidad corrosiva de un ambiente es necesario describir con qué tipo de material está interactuando, ya que los diferentes elementos de los que están compuestos los materiales permiten que bajo ciertas condiciones se presente mayor menor resistencia a la corrosión. (ASM, 2000)

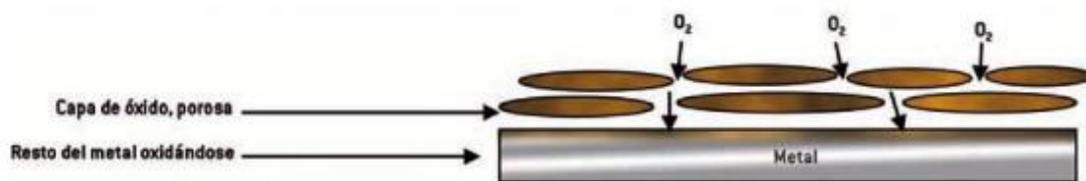
Oxidación del Acero

La oxidación es un proceso específico de la corrosión en la que interactúa el acero y el oxígeno del ambiente, la razón por la cual este fenómeno es más rápido que otros es debido a que el hierro tiene pocos electrones en su última capa atómica y para llegar a estabilizarse cede sus electrones al oxígeno para llegar a un equilibrio y formar una capa o sectores de Fe_2O_3 . (Morales et al., 2013)

A diferencia de la oxidación del aluminio o el zinc, el óxido de hierro tiene una forma porosa en la superficie del acero la cual permite que el acero se siga exponiendo al aire y por ende se siga oxidando, como se observa en la figura 1, este tipo de forma también actúa como una esponja y hace que se retenga en su superficie la humedad del aire, afectando seriamente a toda la estructura de la pieza. (Morales et al., 2013)

Figura 1:

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



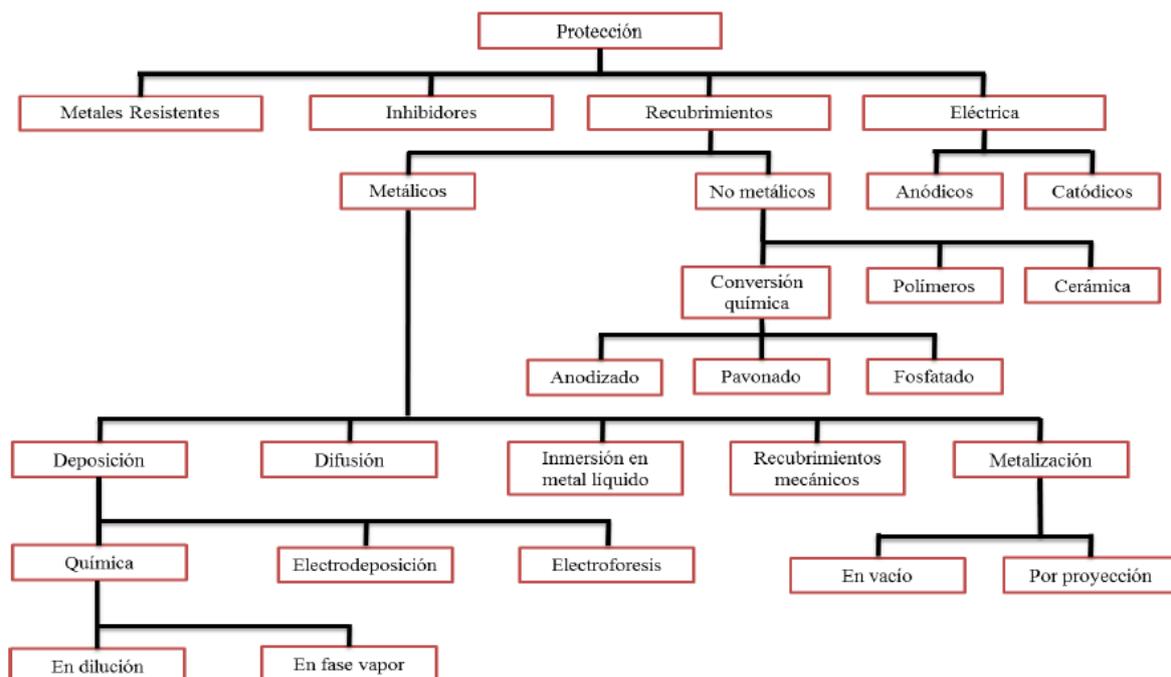
Nota: Esta es la formación natural del óxido en cualquier tipo de acero que no tenga en su composición un componente antioxidante. Fuente: (Morales et al., 2013)

Procesos de protección superficial

Para prevenir la oxidación y demás tipos de corrosión se han desarrollado varios tipos de procesos, entre los cuales se hallan la modificación del material desde su creación (aceros inoxidables) y el recubrimiento de superficies por medio de varios factores, los cuales se los puede observar en la figura 2. Uno de los tratamientos más antiguos usados en la industria es el pavonado, que corresponde a la protección superficial por conversión química.

Figura 2:

Diferentes tipos de protección superficial



Nota: Esquema extraído de (Pérez Jerez, 2015)

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. Este consiste en crear una capa protectora en toda la superficie de la pieza que este compuesta de magnetita y óxido férrico-ferroso. (IQR, 2021)

La diferencia entre la capa de óxido del pavonado y el óxido normal es que el pavonado es una capa homogénea y uniforme en toda la superficie que no permite la interacción del oxígeno del ambiente u otros agentes oxidantes con el acero, como se muestra en la figura 3

Figura 3:

Representación de la capa de óxido formada por el pavonado



Pavonado En Caliente (Térmico)

El pavonado en caliente, por calor o en aceite es uno de los métodos tradicionales usados en la industria para pavonar, se usa generalmente en piezas pequeñas como pasadores, tornillos, clavos, etc. Este método consiste en calentar a las piezas de acero en un rango de temperatura de 200°C a 400° C y posteriormente sumergirlo completamente en aceite. El acabado del proceso depende de la temperatura y la metalurgia de la pieza, pero en general se obtiene un tono azulado profundo. (NRA FAMILY, 2020)

Aceites industriales

A lo largo de los años con los avances tecnológicos que ha tenido la humanidad, se ha logrado desarrollar distintos tipos de aceites con distintas características y aplicaciones. En general se los puede dividir en dos grandes grupos, los cuales son: lubricantes y refrigerantes, que como indica sus nombres sirven para evitar el desgaste prematuro de las piezas mecánicas y un calentamiento excesivo al momento de trabajar respectivamente.

La Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE) ha desarrollado un sistema de clasificación para los aceites basado en la viscosidad que tienen a diferentes temperaturas, la cual se observa en la tabla 2.

- Los aceites con la letra W en su nombre indican que sus especificaciones se basan en la viscosidad dinámica cuando trabajan a bajas temperaturas.

- Los aceites que no tiene la letra W indican que el aceite tiene propiedades específicas en su viscosidad dinámica y cinemática cuando trabajan en rangos de temperaturas altas (Mott, 2006)

Aceites minerales

Los aceites minerales son aceites que se consiguen destilando el petróleo crudo en 2 etapas, destilación atmosférica y al vacío. Estos aceites están compuestos en su gran mayoría por hidrocarburos y mezclas complejas de parafinas y nafténicas que al ser tratados en distintos procesos y añadiendo aditivos extras adquieren distintas propiedades que sirven para trabajo más específicos en la industria. (Wagner et al., 2009)

Las características principales que se aprovechan de los aceites minerales son: no son conductores de calor, no son conductores de electricidad y son aislantes de aire y humedad. Por lo que se los usa generalmente para proteger a los componentes de las máquinas industrial de la corrosión. (Curiosoando, 2018)

Aceites sintéticos

Los aceites sintéticos son aquellos que no son obtenidos directamente del petróleo, sino que son creados en un laboratorio mediante un proceso de sinterización con reacciones químicas complejas para alterar la estructura molecular de sus componentes. Sus características son mucho mejores que los aceites minerales y por ende tienen un mayor costo. (Casado de Diego, 2014)

Tabla 2:

Valores de viscosidad de distintos aceites según la clasificación SAE

Grado de viscosidad SAE	Viscosidad a Baja Temperatura (°C), cP		Viscosidades en alta temperatura (°C)		
	Máx. Arranque	Max. De Bombeo	Cinemática (cSt) a 100°C min.	Cinemática (cSt) a 100°C max.	Alta Tasa de Corte (cP) a 150°C D4683, D4741 y D5481
0W	6200 a -35	60000 a -40	3,8	-	-
5W	6600 a -30	60000 a -35	3,8	-	-
10W	7000 a -20	60000 a -30	4,1	-	-
15W	9500 a -15	60000 a -20	5,6	-	-
20W	13000 a -10	60000 a -15	5,6	-	-
25W	-	-	9,3	-	-
20	-	-	5,6	< 9,3	2,6
30	-	-	9,3	<12,5	2,9
40	-	-	12,5	<16,3	3,5 (0W-40, 5W-40, 10W-40)
40	-	-	12,5	<16,3	3,7 (15W-40, 20W-40, 25W-40, 40)
50	-	-	16,3	<21,9	3,7
60	-	-	21,9	<26,1	3,7

Nota: Tabla extraída de (Noria, 2021)

Pavonado en Frío (Químico)

El pavonado en frío o por reacción química consiste en modificar la superficie de la pieza de acero mediante una reacción química controlada que genera una capa de óxido en toda la superficie de contacto. Los agentes químicos que más se utilizan en el agente oxidante son: el hidróxido de Sodio ($NaOH$), Nitrato de Sodio (NO_3Na) y el Nitrato de Potasio (NO_3K), para poder ser creado se necesita mezclar estos compuestos con agua y calentarlos a una temperatura de aproximadamente 100°C (Pérez Jerez, 2015)

Este compuesto químico es de naturaleza exotérmica, por lo que en su proceso de creación libera calor en el agua, y debido a su composición hace que el agua aumente su punto de ebullición hasta un aproximado de 140°C. (Font Pérez, 1991)

Limpieza superficial

Uno de los factores que más influye en el pavonado químico es el estado de la superficie, no tanto por su rugosidad, sino por la cantidad de agentes extraños al acero haciendo que, en general, el resultado final puede tener dos caminos diferentes.

Cuando no se limpia la pieza de acero el pavonado adquiere un color marrón y produce hidróxido ferroso en la solución química, que al seguir interactuando con los demás compuestos termina convirtiendo en un compuesto magnético de óxido férrico-ferroso. Lo cual altera a la uniformidad de la capa del pavonado y a la composición química de la solución. (R.H. Angier, 1936)

Por otra parte, cuando la superficie del acero está libre de impurezas el proceso de pavonado químico ocurre con normalidad. En esta reacción también se producen pequeñas cantidades de hidróxido férrico, pero estas no son lo suficientemente grandes como para afectar por completo a la pieza.

Debido a la formación del hidróxido férrico se debe cambiar la solución usada por una nueva y limpiar profundamente el recipiente en donde se realice el pavonado. (Llorenç Carbonell Domenech, 2014)

Ensayos de corrosión acelerada

Existen algunos ensayos que permiten recrear y acelerar las condiciones ambientales necesarias para que se produzca la corrosión en los elementos metálicos, con el objetivo de estimar el grado de resistencia de los materiales ante distintas condiciones ambientales. En estos ensayos se puede controlar los parámetros de: agente corrosivo, temperatura, grado de corrosión y tiempo, para que los resultados tengan una mayor confiabilidad. (Infinitia, 2020).

Ensayo de inmersión Alternada y norma INEN 1190

La norma INEN 1190 indica las características del ensayo de inmersión alternada, el cual consiste en sumergir las probetas en una solución salina durante un periodo de tiempo

y posteriormente sacarlas durante otro periodo y observar la formación de la capa de óxido en la superficie. Este proceso tiene un comportamiento cíclico y puede repetirse las veces que sean necesarias según sea acordado entre las partes involucradas. (INEN, 2013)

La característica principal de esta norma y ensayo es que no requiere ningún equipo especial para su ejecución, ya que solo necesita un mecanismo que soporte a las probetas y las mantenga a un nivel dentro de la solución salina y fuera durante el periodo de prueba.

Los otros requerimientos para el ensayo son:

- El material del mecanismo debe ser de un material que no contaminen a las probetas a ensayar.
- La solución salina del debe estar compuesta por 3.5% de NaCl y 96.5% de agua a 25°C, es decir condiciones ambientales.
- El pH debe encontrarse en un rango entre 6.4 y 7.2
- Los tiempos de ejecución del ensayo son 10 minutos de sumersión y 50 de exposición ambiental.
- Los resultados pueden ser comprobados por la norma INEN 1176 (INEN, 2013)

Determinación de la Resistencia a la Corrosión

Después de haber realizado el ensayo de corrosión acelerada que mejor se ajuste al experimento, es necesario cuantificar los datos o categorizarlos para saber de una manera más precisa cuan efectivo es el método de anticorrosión que se aplicó a las probetas. De igual manera existen normas que se pueden aplicar.

Norma INEN 1176

La norma INEN 1176 es la que va a la par con la norma 1190 ya que determina el porcentaje de manchas de óxido que se forman después de ser aplicado el ensayo de corrosión acelerada. Esta norma tiene un proceso para cuantificar la cantidad de óxido en la superficie de la pieza; consiste en utilizar una malla con cuadrados de 5x5mm y cubrir toda la superficie, con esto se va contando la cantidad de cuadrados que poseen una mancha de

óxido y después con la ecuación 1 se categoriza a la cantidad de óxido según como indica la tabla 3.

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

Donde:

- n: es la cantidad de manchas de corrosión
- N: es el número de cuadrillas que cubren la superficie de análisis

Tabla 3:

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

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

Nota: Tabla extraída de (INEN, 1984)

Propiedades mecánicas del Acero

El acero es el material más importante utilizado en nuestro mundo debido a las propiedades de alta resistencia a la deformación en tensión y compresión, tiene una alta factibilidad de producción a un precio bajo y al combinarse con otros elementos puede mejorar aún más sus propiedades, lo que lo hace perfecto para diversas aplicaciones en toda industria. (AHMSA, 2019)

Resistencia a la deformación

El acero tiene la característica de ser, en la mayoría de su composición, homogéneo e isotrópico, lo cual permite soportar grandes esfuerzos con una pequeña área de trabajo. Esta característica puede aumentar o disminuir dependiendo de la composición química del acero y su proceso de fabricación, ya que estos dos factores influyen en el tamaño y resistencia del grano del material. (AHMSA, 2019)

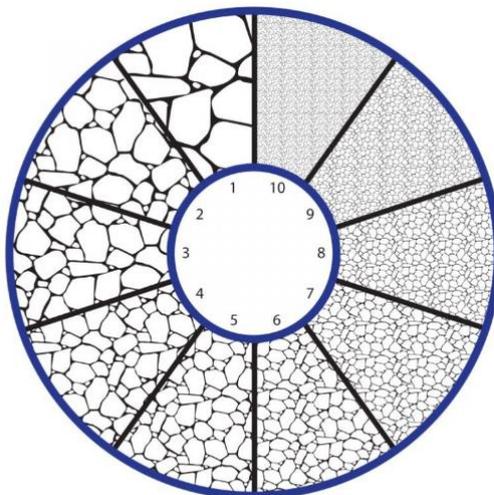
Mientras exista un mayor número de granos en un área determinada del acero, este aumentará sus propiedades mecánicas de dureza, pero en cambio perderá ductilidad, es decir se volverá más frágil.

Determinación del tamaño de grano

El tamaño del grano y su distribución se determinan mediante técnicas de conteo promedio en base al volumen, diámetro o área a analizar. El más común es el trazado de líneas, el cual nos da un tamaño de grano promedio por cada fotomicrografía analizada. Las características del material en base al tamaño de grano están normadas por la ASTM, la cual tiene 10 cartas normalizadas que indican el tamaño de grano promedio de los aceros.(Callister, 1995), como se observa en la figura 4.

Figura 4:

Diferentes tamaños de grano catalogados según la ASTM



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

Con la ecuación 2 podemos determinar el número de granos por mm y con la ecuación 3 obtenemos el tamaño de grano.

$$\overline{N}_L = \frac{N_i}{L/M} \quad (2)$$

$$G = (6.643856 * \text{Log}_{10} \overline{N}_L) - 3.288 \quad (3)$$

Donde:

- N_i : es la cantidad de granos contados que cruzan la intersección
- L: es la longitud total de las intersecciones
- M: es el factor de aumento de la lente (100x)

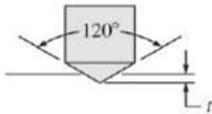
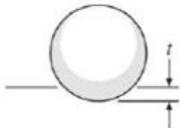
Dureza y ensayos de dureza

La dureza de un material representa la resistencia que tiene a la deformación plástica, es decir, permanente. Este tipo de característica se la mide mediante la evaluación de la penetración de un indentador en la superficie del material, por obvias razones el material debe ser más duro que el material a analizar, para que pueda realizarse el ensayo

con total confiabilidad. En la figura 5 se muestran los diferentes tipos de indentadores, durezas y condiciones más comunes utilizadas en este tipo de ensayos. (Smith et al., 2006)

Figura 5:

Principales diferencias entre los diferentes sistemas de dureza

Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador		Carga	Fórmula del número de dureza
		Vista lateral	Vista en planta		
Rockwell A } C } D }	Cono de diamante			60 kg $R_A =$ 150 kg $R_C =$ 100 kg $R_D =$	100-500f
B } F } G }	Esfera de acero de $\frac{1}{16}$ pulgadas			100 kg $R_B =$ 60 kg $R_F =$ 150 kg $R_G =$ 100 kg $R_E =$	
E	Esfera de acero de $\frac{1}{8}$ pulgadas				

Nota: Cuadro extraído y modificado de (Smith et al., 2006)

Acabado superficial

Todos los materiales, piezas, máquinas adquieren una textura en su superficie que puede describirse a grandes rasgos como áspera o lisa. En el caso del acero el estado de su superficie puede describir rasgos geométricos y propiedades químico-físicas que éste posea, pero también puede dar información acerca de las propiedades mecánicas y metalúrgicas. El estado de la superficie o la integridad superficial se debe considerar en las operaciones de manufactura ya que tiene influencia directa en las propiedades como la resistencia a la fatiga, corrosión y la vida útil de la pieza. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

La rugosidad es conocida como los picos irregulares que tiene el material en una escala pequeña esparcidas por toda su superficie, lo que provoca que exista un mayor coeficiente de fricción en el contacto de piezas y se produzca un desgaste más apresurado, en la figura 6 se tiene una representación de una superficie x en un material cualquiera cuyos datos pueden ser interpretados con el uso de las ecuaciones 4 y 5.

$$Ra = \frac{a + b + c + d + \dots}{n} \quad (4)$$

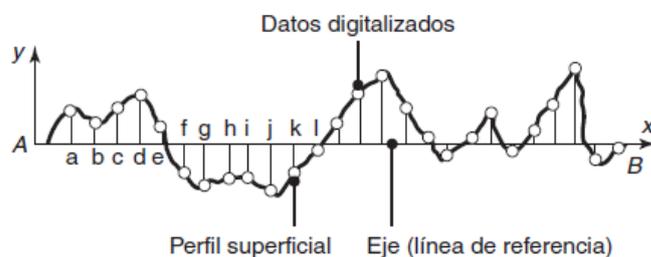
$$Ra = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots}{n}} \quad (5)$$

Donde:

- a, b, c, d,: son los valores de los picos de la topografía de la superficie del material.
- n= es la cantidad de lecturas. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Figura 6:

Topografía de una superficie de un material aleatorio

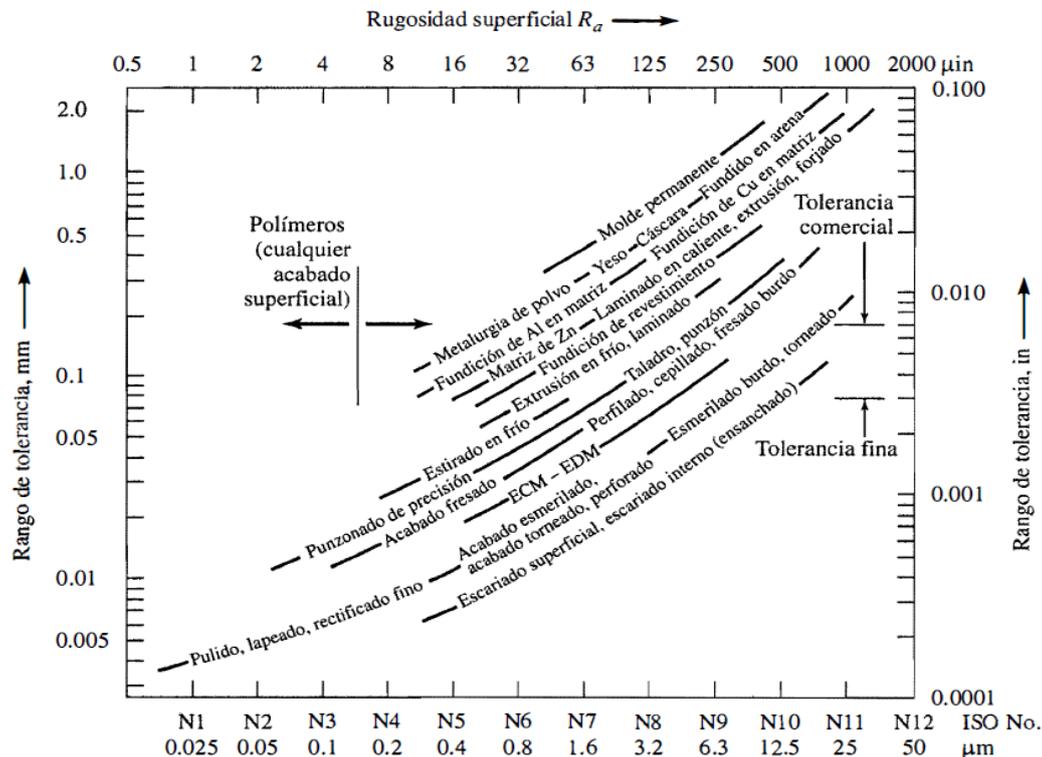


Nota: figura extraída de (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Para una interpretación más práctica a la rugosidad se le ha asignado valores alfanuméricos que permiten un mejor entendimiento de sus valores geométricos y por lo tanto se puede asignar de mejor manera un proceso de manufactura para poder conseguirlo, como se muestra en la figura 7.

Figura 7:

Clasificación ISO de la rugosidad y acabado superficial para los distintos procesos de manufactura



Nota: La clasificación ISO detalla que el mejor acabado superficial que se puede conseguir es el N1 y el peor el N12, extraído de (Schey et al., 2002)

Diseño del Experimento

El diseño de experimentos (DoE), ha sido una herramienta empleada formalmente desde los años 20, que se usa para optimizar y mejorar el estudio de los experimentos que requieren un manejo y control de varias variables que se sabe que influirán en el resultado final. Vienen siempre acompañados de procesos estadísticos para ser analizados posteriormente y poder entender de mejor manera cual es la variable más influyente en el experimento. (Tanco et al., 2009)

Los métodos clásicos de DoE consisten en análisis de un factor a la vez (OFAT) y métodos del tipo malla como los diseños factoriales, cuyo análisis radica en analizar el

resultado de un resultado en base a alterar una variable a la vez, es decir se tiene la misma cantidad de experimentos que la multiplicación del número de variables a analizar. Esto conlleva a adquirir una gran cantidad de materiales de ensayo y un gran tiempo de análisis posterior, sin embargo, los resultados no muestran explícitamente los puntos críticos del experimento. (Tanco et al., 2009)

Enfoque de Taguchi

La metodología de Taguchi permite estudiar a los factores o variables de un experimento como variables de control y variables de ruido. Las primeras son las principales que intervienen en el experimento y se pueden controlar al 100%, las segundas son las que no se pueden controlar y dependen del entorno de trabajo y proceso de fabricación. (Tanco et al., 2009)

El trabajo que desarrolló Taguchi fue el de trabajar con las técnicas de diseños factoriales y fraccionarlas a tal grado de que dichas fracciones formen arreglos ortogonales específicos, los cuales hace que interactúen de manera correcta (o con menor riesgo) las variables de control y las variables de ruido, lo que proporciona un experimento óptimo en cuanto a estudio de variabilidad y entorno de desarrollo (Montgomery, 2003). Este tipo de diseño se lo conoce como diseño robusto y se centra en los siguientes puntos:

- Diseño de productos que no sea sensible a una varianza en sus factores por n componente del sistema al que pertenece.
- Diseño de productos en el cual el proceso de manufactura esté o se ejecute con las mejores especificaciones técnicas posibles.
- Las condiciones de operación de los procesos cuyos factores críticos se encuentren lo más cerca del objetivo de operación. (Montgomery, 2003)

La idea esencial de este tipo de diseño es que se pueda identificar el nivel apropiado de los factores para que el rendimiento del experimento sea lo menos sensible a los factores de ruido. (Tanco et al., 2009)

Análisis ANOVA

El análisis de la varianza (ANOVA) es un tipo de análisis que permite estudiar el comportamiento de un resultado basado en la variabilidad de la media continua, cuando este fue aplicado en 2 o más grupos con 1 o más factores cada uno con dos o más niveles. Es decir, analiza la media de los datos de cada grupo y los compara para obtener otro valor de media general, el cual puede compararse con los demás resultados para así apreciar de mejor manera el comportamiento del cambio de variables en diferentes grupos de estudio. (Amat, 2016)

Se puede aplicar el análisis ANOVA cuando existe alguno de los siguientes casos:

- Cuando en el estudio hay 2 o más grupos cuyos resultados necesiten ser comparados.
- Cuando existen 2 o más mediciones repetidas
- Cuando se pueda variar los factores principales de estudio en 2 o más niveles.
- Cuando se requiere analizar de forma simultánea el resultado de dos tratamientos diferentes, ya sean estos por separados o en una interacción. (Dagnino, 2014)

Capítulo III Metodología

Diseño del experimento y selección de variables

Como se ha establecido en el objetivo de este proyecto, se realizó un análisis comparativo entre dos diferentes procesos de pavonado para determinar bajo qué características se puede obtener la mejor resistencia a la corrosión. Adicionalmente a esto se estudió el comportamiento de dureza y la microdureza en el caso del pavonado térmico.

Para cada proceso de pavonado se ha establecido tres factores de análisis; 2 de los cuales poseen 3 niveles, que corresponden al tipo de fluido de sumersión (tipo de aceite y químico) y el acabado superficial que tienen las probetas (normal, con lija, rectificado). El factor principal corresponde a la variable principal del proceso, las cuales son: temperatura y tiempo de sumersión.

Selección de parámetros para el pavonado

Para los dos tipos de pavonado se estableció el acabado superficial como un factor similar, en cambio sus otros dos factores son dependientes del proceso en sí. Para el pavonado térmico se requiere como variable de control la temperatura con un rango de 270°C a 420°C, este rango se debe a la disponibilidad y capacidad de trabajo de los hornos del laboratorio como se explica más adelante. Y como segundo factor, el fluido de sumersión, se seleccionó los aceites 10w30 y 20w50 por su diferencia de viscosidades como se ve en la tabla 2, y el aceite quemado de motor debido a que según varias fuentes tiene una buena respuesta en el pavonado.

En cambio, para el pavonado químico se estableció como variable de control el tiempo de sumersión con un rango de 15 a 90 minutos, ya que según recomendaciones del fabricante del agente químico se debe sumergir a la pieza durante al menos 1 hora, de esta manera se observó los resultados de dejar menos y más tiempo del recomendado. Y el segundo factor fue la concentración del agente químico, ya que de igual manera la recomendación del fabricante fue la de enfriar con agua el proceso de pavonado, para que

no supere los 100°C, lo que dio pie a la incógnita de: ¿Hasta qué concentración puede ser viable el pavonado químico?, teniendo como niveles en este factor: 100%, 75% y 50% de concentración.

Diseño de Taguchi

Para dimensionar de mejor manera el experimento y obtener resultados optimizados se usó una malla ortogonal L18, la cual posee 3 factores, de los cuales 2 poseen los niveles que se necesitan y el otro factor posee 6 niveles, el cual es adecuado para abarcar el rango de estudio del factor principal. Con la ayuda del software MINITAB se creó las tablas de ensayos correspondientes para cada proceso, como por ejemplo la tabla 4, que posee las combinaciones necesarias para el proceso de pavonado térmico.

Tabla 4:

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

De igual forma para el proceso de pavonado químico se creó una tabla de igual magnitud, variando el factor principal y el fluido de sumersión.

Para obtener un mejor rendimiento de los datos se tenía que realizar al menos 3 réplicas de cada ensayo, lo que para esta investigación da un total de 108 ensayos. Adicional a esto se añadió 3 probetas más por acabado superficial para el análisis inicial, es decir sin aplicar el pavonado. Y en total se usó 117 probetas.

Preparación de las probetas de ensayo

El material a utilizar es el acero AISI 1018, conocido también como acero comercial. Se seleccionó este acero debido a que en su composición química no existe cromo, lo cual lo vuelve muy susceptible a la corrosión, también por su buena maquinabilidad y fácil adquisición. El factor de corrosividad en este caso es esencial ya que con esto se determinó con mayor facilidad la resistencia a la corrosión de los procesos de pavonado.

Las probetas a ensayar tienen como dimensiones: 12.7mm de diámetro y 100mm de largo, como se observa en el plano del anexo 1. Estas dimensiones nos proporcionan una superficie de análisis de 3989.82 mm^2 , haciéndola apta para el estudio de la norma INEN 1176.

Mecanizado

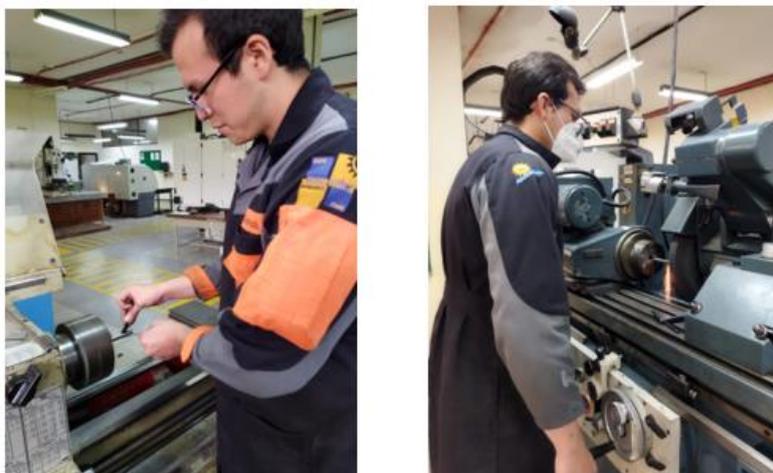
Cualquier tipo de acero comprado trae consigo rebabas y superficies irregulares, por lo cual, para trabajar con probetas más regulares se mecanizó a todos los ejes con un refrentado en sus dos lados y un lijado preliminar con lija n100. Con estos dos procesos se obtuvo las primeras 36 piezas de acabado superficial normal.

Para obtener el siguiente acabado superficial fue necesario lijar la superficie de los ejes hasta obtener un acabado tipo pulido, el cual se obtiene lijando la superficie con una lija del número n1000 en adelante, para esto se usó el torno paralelo de la figura 8 y se procedió a lijar con lijas n100, n200, n400 y n1000 para eliminar en gran medida las irregularidades de la superficie.

Para el último acabado superficial se utilizó la rectificadora de ejes de la figura 8, la cual deja la superficie uniforme y con un acabado del tipo pulido, pero con diferencias notables con respecto a la lija, como se ve en la figura 9.

Figura 8:

Máquinas herramientas utilizadas para el mecanizado de las probetas



Nota: Al lado izquierdo se tiene el torno paralelo y al lado derecho la rectificadora de ejes

Figura 9:

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



Nota: Al lado izquierdo se tiene las probetas pulidas con lija y al lado derecho se tiene las probetas con el pulido de piedra de rectificar.

Después de mecanizar la superficie y obtener los tres tipos de acabado superficial se seleccionó al azar 18 probetas de cada tipo de acabado y se realizó un planeado en la

fresadora para obtener una superficie plana para llevar a cabo los ensayos de dureza, como se ve en la figura 10.

Figura 10:

Probetas mecanizadas en la fresadora



Nota: Se mecanizó en lados paralelos para asentar de mejor manera la probeta en el equipo de dureza

Después de todo el mecanizado realizado se obtuvo las 117 probetas para realizar los dos tipos de pavonado con todas sus réplicas.

Limpieza

Como ya se mencionó, uno de los factores que altera la calidad del pavonado es la limpieza superficial de las piezas, y debido a que en el mecanizado las probetas interactuaron tanto con el aire como con el refrigerante, es necesario limpiar su superficie. Para lo cual se utilizó principalmente el líquido desoxidante WD-40, y con una franela nueva se procedió a limpiar toda la superficie de las piezas, como se observa en la figura 11.

Para ciertas probetas que necesitaban ser transportadas constantemente entre laboratorios se usó un recubrimiento posterior de plástico, ya que éste evitaba la oxidación que el acero adquiere al estar en contacto con la mano humana.

Figura 11:

Útiles de limpieza para las probetas



Nota: Se aplicó WD-40 a todas las probetas y se las limpio con la franela, las piezas que debían transportarse a mano para otros propósitos se envolvieron en plástico.

Posterior a la limpieza con WD-40 se almacenó a las probetas en contenedores sellados y fueron sumergidas en aceite como se ve en la figura 12, para así evitar el contacto con el aire hasta su uso en su respectivo proceso de pavonado.

Figura 12:

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

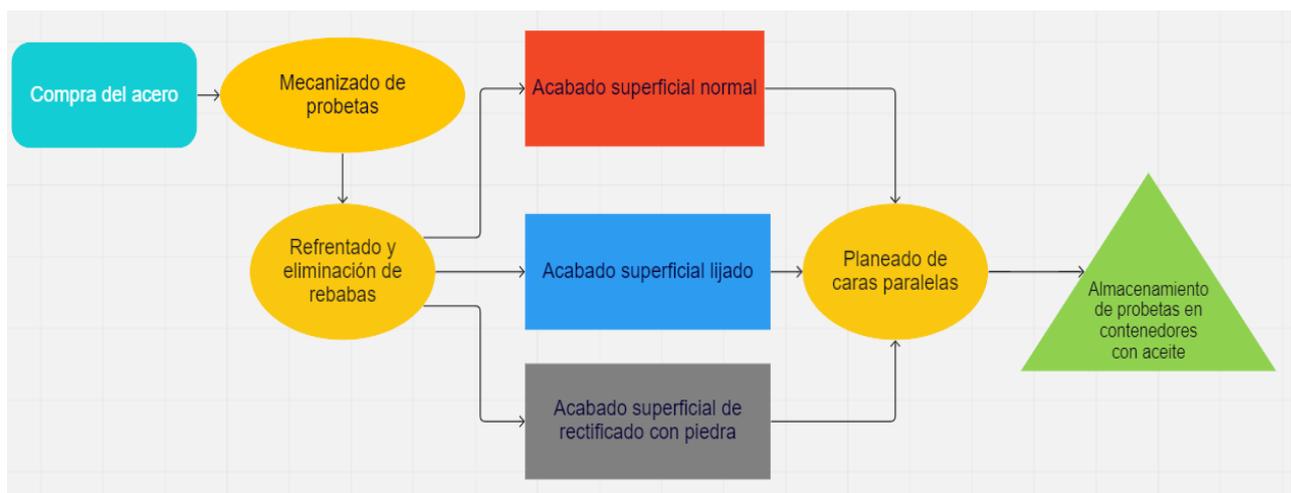


Nota: Se usó aceite 20w-50 debido a la gran cantidad adquirida

De una manera resumida en la figura 13 se encuentra un diagrama de flujo del proceso de mecanizado.

Figura 13:

Proceso de mecanizado y almacenamiento

***Pavonado Térmico***

El proceso del pavonado térmico realizado fue relativamente sencillo y las combinaciones a utilizar se observan en la tabla 4. Para poder controlar de mejor manera dichas temperaturas se utilizaron 2 hornos; el primero, de la figura 14, es un horno de baja

potencia utilizado para materiales poliméricos denominado FISHER Isotemp, cuyos valores de trabajo van desde la temperatura ambiente hasta un máximo de 270 °C.

Figura 14:

Hornos utilizados para el pavonado térmico



Nota: El horno del lado izquierdo es el horno FISHER Isotemp, el del lado derecho es el horno Wild Barfield

El segundo horno, de la figura 14, es un horno de alta potencia denominado Wild Barfield cuyo valor máximo de temperatura es de 900°C. Se usaron estos dos hornos debido a la falta de precisión en el control de temperatura en temperaturas bajas del segundo horno, dicho error se puede observar en la figura 15.

Figura 15:

Encerado de Temperatura del horno Wild Barfield



Nota: Para corregir el exceso de temperatura del horno se enceró en un valor menor al seleccionado para poder estabilizarlo adecuadamente

Post limpieza y codificado de las probetas de pavonado térmico

Para comenzar con el proceso de pavonado fue necesario quitar todo el aceite de la superficie de las probetas después de ser sacadas del contenedor de almacenamiento, mediante una limpieza con franela y una pequeña aplicación de WD-40. Después de esta limpieza las probetas fueron codificadas según la combinación de variables descrita en la tabla 4, dichos códigos fueron hechos con la herramienta Dremel en un extremo de cada probeta, como se observa en la figura 16.

Figura 16:

Primeras tres probetas de pavonado con su código respectivo: A1



Procedimiento del pavonado térmico

Mientras se codificaba a las probetas se encendió el horno FISHER Isotemp y se lo configuró para que se caliente y llegue a la temperatura de 270°C. Después de que el horno llegará a 270°C se introdujo 9 probetas que tienen como variable la misma temperatura, es decir las que corresponden a los códigos A1, A2, A3.

Para asegurarse de que todo el cuerpo de las probetas se encuentre a la misma temperatura se esperó un tiempo aproximado de 15 minutos dentro del horno. Tiempo obtenido de la ecuación de transferencia de calor transitoria.

Después de haber introducido las probetas al horno, se preparó 3 recipientes con diferentes aceites, en los cuales serían sumergidas todas las probetas. Estos aceites fueron: 10w30, 20w50 y aceite quemado, como se observa en la figura 17.

Figura 17:

Recipientes llenos de aceite para pavonar



Nota: Desde la izquierda, los tipos de aceite son: aceite quemado, aceite 20w50 y aceite 10w30

Después de 15 minutos en el horno a la temperatura de 270°C se retiró las probetas del horno y de manera inmediata fueron sumergidas en su respectivo aceite, generando así la capa de óxido que protege al acero, es decir el pavonado. Se realizó el mismo proceso para las 45 probetas restantes y la diferencia más notable al principio fue su coloración. En la figura 18 se observa que las tonalidades obtenidas del pavonado con distintas temperaturas y aceites van desde el naranja rojizo hasta el azul oscuro.

Figura 18:

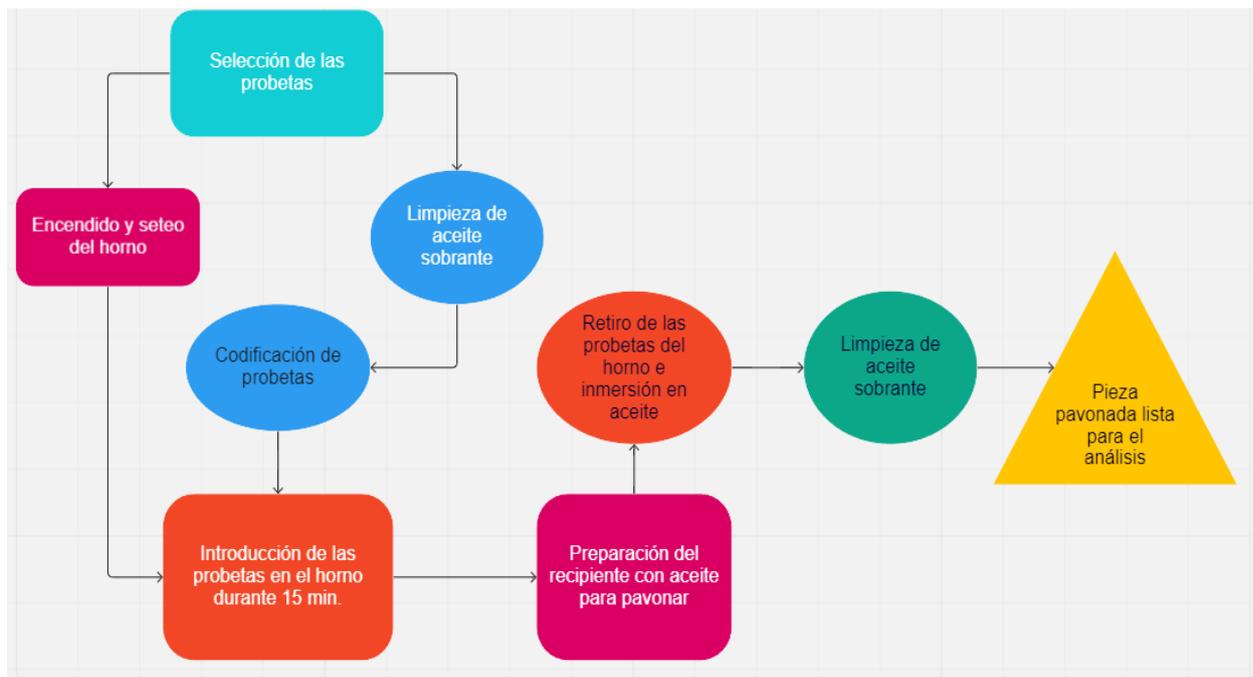
Distintas tonalidades del acero obtenidas mediante el proceso de pavonado térmico con distintas temperaturas y aceites



Nota: Se muestran 18 de las 54 probetas pavonadas

Posterior al pavonado se limpió el exceso de aceite y se almacenó de nuevo las probetas hasta utilizarlas nuevamente en el ensayo de dureza y resistencia a la corrosión.

En la figura 19 se tiene un diagrama de flujo del proceso de pavonado térmico.

Figura 19:*Proceso del pavonado térmico****Pavonado Químico***

El proceso de pavonado químico requiere más accesorios que el pavonado térmico, para realizar el pavonado químico se requirió elevar la temperatura del agente químico hasta un aproximado de 100°C y mantenerlo estable durante el tiempo de análisis establecido. Para lo cual se utilizó: una hornilla eléctrica marca UMCO, una olla de acero inoxidable, alambre galvanizado para sostener las probetas, y 2 soportes metálicos, cuyas medidas se observan en el anexo 2.

Preparación de las probetas y de la zona de trabajo

De igual manera que para el pavonado térmico, se retiró las probetas de los contenedores y se las marcó con su respectivo código, la tabla 5 muestra las 18 combinaciones de tiempo de sumersión y porcentaje de agente químico utilizado para pavonar.

Tabla 5:

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

Nota: Se tiene un total de 18 ensayos para el pavonado químico, con un tiempo de sumersión que comienza en 15 minutos hasta 90 minutos.

Para poder sostener las probetas dentro del agente químico se construyó 4 soportes de metal con 2 niveles de altura. Para poder sostener a las probetas mientras son pavonadas se enrolló alambre galvanizado en palitos de madera, para que a manera de gancho sostengan y mantengan de forma estática a las probetas dentro del agente químico.

Para que el agente químico pueda actuar y oxidar a las probetas fue necesario calentarlo y mantenerlo estable a 100°C, lo que se logró mediante una hornilla eléctrica y una olla de acero inoxidable, el material de la olla fue de suma importancia ya que este no sería afectado por el agente químico. Toda esta descripción de la zona de trabajo se la puede apreciar de mejor manera en la figura 20.

Figura 20:

Zona de trabajo establecida para el pavonado químico



Procedimiento del pavonado químico

Después de establecer la zona de trabajo se preparó a las probetas y se las codificó de igual manera que en el pavonado térmico, según la tabla 5. Como primer paso se colocó a una probeta dentro de la olla y con el alambre galvanizado se reguló la altura de ésta, para que no entre en contacto con las paredes de la olla. Después se agregó el agente químico denominado PavonBlack de la figura 21, hasta que cubra toda la superficie de la probeta, lo cual fue hasta un aproximado de la mitad de la olla.

Figura 21:

Galón de agente químico PavonBlack



Una vez regulada la altura se añadió otras 5 probetas a la olla para optimizar el tiempo de ensayos. Con las probetas listas se encendió la hornilla eléctrica y se controló la temperatura del agente químico con un termómetro de mercurio. Como se observa en la figura 22 la temperatura solía pasar de los 100°C y para poder enfriarlo fue necesario apagar momentáneamente la hornilla.

Figura 22:

Verificación de la temperatura con un termómetro de mercurio



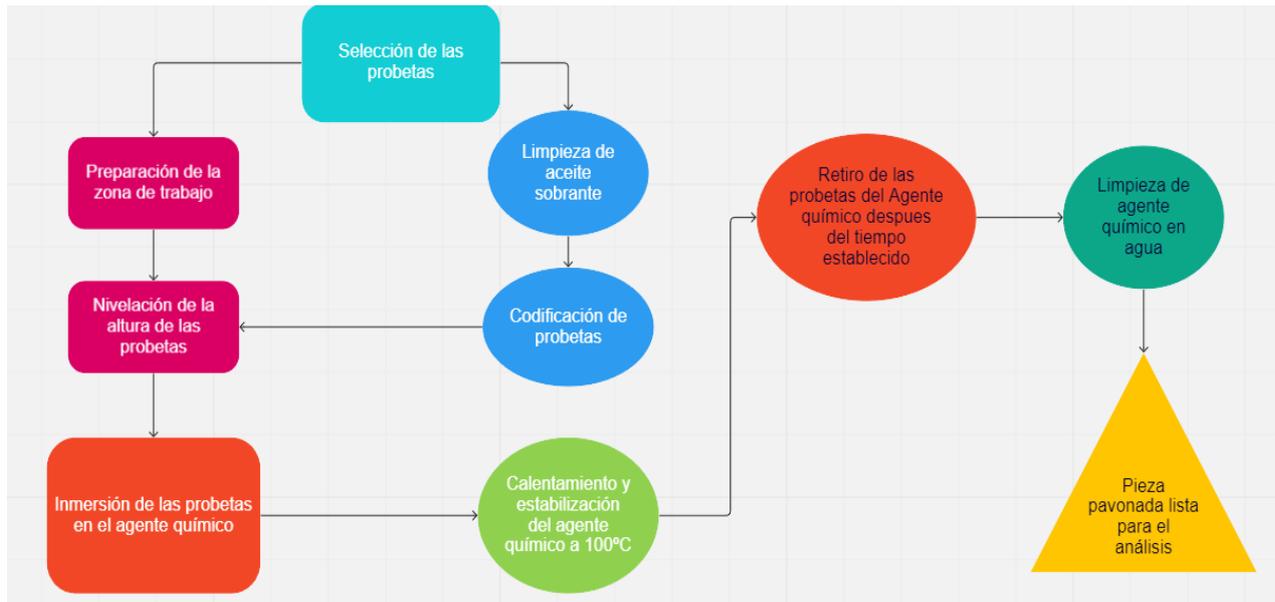
Pasado el tiempo de sumersión deseado de las probetas se les retiró del agente químico y se las sumergió en agua para limpiar y quitar todo el agente químico y así evitar que se siga generando la capa de óxido. Al final del proceso se observó que las tonalidades obtenidas en las probetas son grises, café y negro como lo muestra la figura 23, también se notó que, para las primeras probetas, es decir la de sumersión de 15 minutos la capa de óxido es escasa.

Figura 23:

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



El proceso del pavonado químico se lo puede observar de mejor manera en la figura 24.

Figura 24:*Proceso del pavonado químico****Ensayo de Dureza***

La primera prueba realizada para la presente investigación fue el ensayo de dureza superficial, para determinar si la capa de óxido generada por el pavonado incrementaba o disminuía esta propiedad. Para llevar a cabo las pruebas se usó el durómetro Rams Rockford del Laboratorio de Mecánica de Materiales de la figura 25, con capacidad de medir directamente la dureza Rockwell B y Rockwell C.

Figura 25:

Durómetro Rams Rockford



El primer paso fue calibrar el durómetro y verificar que marque la medida del reloj comparador, para eso se usó una placa patrón con dureza HBR 88.16, como se ve en la figura 26, se ajustó el durómetro en 88 HBR debido a que no posee cifras decimales en su apreciación.

Figura 26:

Calibración del durómetro con el patrón HBR 88



Después de calibrar el equipo se procedió a tomar las medidas de dureza en tres puntos de las probetas; en el centro, al lado izquierdo y al lado derecho. Para obtener la información de crecimiento o decrecimiento de la dureza en el pavonado se realizó el ensayo de dureza en una probeta sin aplicar ningún pavonado cuyos valores se pueden observar en la tabla 6.

Tabla 6:

Valores de dureza inicial del acero analizado

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

Al finalizar todas las pruebas de dureza se realizaron gráficas de comportamiento para analizar la variación de la dureza según el pavonado, las cuales serán presentadas en el siguiente capítulo del presente trabajo.

Observación de la micrografía

Se realizó un análisis de micrografía en 3 probetas del pavonado térmico para determinar si existía algún tipo de cambio en la microestructura del acero tratado. Como se trabajó a temperaturas del 30% de la temperatura de fusión del acero, es decir cercana a la temperatura de cristalización, fue necesario determinar si existía algún cambio que alterara las propiedades mecánicas del acero.

Las probetas seleccionadas para el análisis fueron las probetas A15 y A17, y para su preparación metalográfica se las cortó por la mitad y se lijó una cara con lijas n: 100, 220, 360, 500, 600, 1000, 1200, 1500, 2000, 2400. Usadas en una mesa de lijado manual, como se ve en la figura 27.

- Longitudes de rectas

$$L1 = L2 = L3 = 40 \text{ mm} \quad Lt = 120\text{mm}$$

- Granos que intersecan con la recta

$$g1 = 15 \quad g2 = 14 \quad g3 = 13 \quad Ni = 42$$

- Cantidad de granos por mm^2

$$\overline{N_L} = \frac{N_i}{L/M} = \frac{42 * 100}{120} = 35$$

- Tamaño de grano

$$G = (6.643856 * \text{Log}_{10} \overline{N_L}) - 3.288 = (6.643859 * \text{Log}_{10}(35)) - 3.288 = 6.97$$

Para todas las mediciones se realizó el mismo procedimiento, los resultados se describen en el siguiente capítulo.

Medición de la rugosidad

Debido a que una variable de control es el acabado superficial, fue necesario determinar si existía cambio en la rugosidad de las probetas después de que se aplicara el pavonado, por lo cual se solicitó el uso del equipo de la figura 29, perfilómetro Bruker, que se encuentra en el Laboratorio de Caracterización de Nanomateriales CENCINAT de la universidad, el cual puede medir rugosidad en perfiles de hasta 27 nm.

Figura 29:

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



Nota: Fotografía extraída de (Campoverde et al., 2022)

Para poder medir la rugosidad en el equipo se preparó a las probetas por separado, se las colocó en tablas de madera sujetas con plastilina y se escribió el código respectivo en una zona visible de la tabla, como se ve en la figura 30. Además, para poder realizar las mediciones se seleccionaron 3 posiciones de la probeta, las cuales son: izquierda, centro derecha.

Figura 30:

Probeta preparada para analizar rugosidad



Nota: Fotografía extraída de(Campoverde et al., 2022)

Después de finalizar con las mediciones se generó un informe con todos los resultados obtenidos, se usó la ecuación 5 para obtener el valor promedio de la rugosidad, pero debido a que el equipo genera automáticamente todos los resultados no hubo necesidad de realizar algún cálculo extra.

En el anexo 4 se encuentra los videos del funcionamiento del equipo de rugosidad.

Resistencia a la corrosión

Para determinar la resistencia a la corrosión que ofrecían las distintas pruebas de pavonado se empleó las normativas INEN 1190 y 1176. La norma INEN 1190 presenta los parámetros para crear una solución salina, la cual se usó para corroer al acero, esta solución es una mezcla diluida de 3.5 partes de cloruro de sodio en 96.5 partes de agua. Para crear la solución se usó SAL MARINA (100% NaCl) y AGUA EMBOTELLADA como se ve en la figura 31, en las proporciones indicadas por la norma, la cual fue 3.5 litros de agua y 127 gramos de sal, como se ve en la figura 32.

Figura 31:

Elementos principales de la solución salina



Figura 32:

Control de la cantidad de las partes de NaCl y agua



Se creó dos soluciones para optimizar el tiempo de trabajo y después se utilizó los mismos soportes del pavonado químico para sostener a las probetas dentro de la solución como se ve en la figura 33. El tiempo establecido de sumersión está establecido en la norma INEN 1190 el cual fue de 10 minutos de sumersión y 50 minutos de secado al ambiente.

Figura 33:

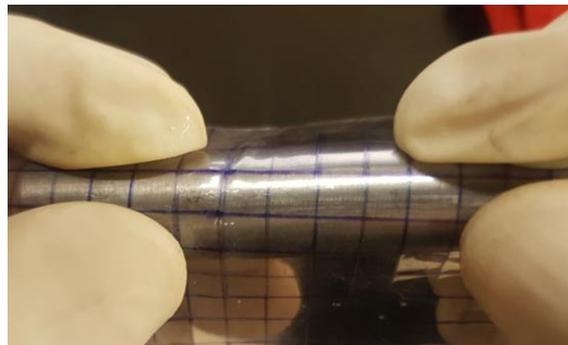
Zona de trabajo de la prueba de resistencia a la corrosión



Para caracterizar el nivel de corrosión en las probetas se aplicó la norma INEN 1176, y se creó una malla con cuadrados de 5x5mm en una hoja de plástico transparente como se ve en la figura 31, con esta malla se puede contabilizar la cantidad de corrosión por área de análisis en cada probeta.

Figura 34:

Conteo de las manchas de corrosión en una probeta sin pavonar



Para obtener datos cuantitativos se usó la ecuación 1, y se la usó de la siguiente manera.

- Cantidad de manchas

$$s1_1 = 47 \quad s1_2 = 61 \quad s1_3 = 55 \quad \bar{s} = 54.33$$

- Cantidad de manchas admisibles

$$A_{cilindro} = 2 * \pi * r * L = 2\pi * \frac{12.7}{2} * 100 = 3989.82 \text{ mm}^2$$

$$A_{malla} = 25\text{mm}^2$$

$$N = \frac{A_{cilindro}}{A_{malla}} = \frac{3989.82}{25} = 159.59 \sim 160$$

- Frecuencia de las manchas

$$F = 100 * \frac{\bar{s}}{N} = 100 * \frac{27.165}{160} = 16.98$$

- Categorización

16.98 → $G - RC$ de 2

De esta manera cada promedio de manchas fue categorizado de acuerdo a la norma INEN 1176, los resultados se muestran en el siguiente capítulo.

Capítulo IV Análisis de Datos

Control del proceso de pavonado térmico y químico

Los primeros datos obtenidos de los procesos de pavonado fue el color que las probetas adquirieron gracias a la variación de los parámetros de control. Mientras que para el pavonado térmico se obtuvo una gama de colores amplia como se ve en la figura 35, para el pavonado químico se obtuvo esencialmente 4 colores, los cuales que se muestran en la figura 36.

Figura 35:

Representación gráfica de los colores obtenidos en el proceso de pavonado térmico

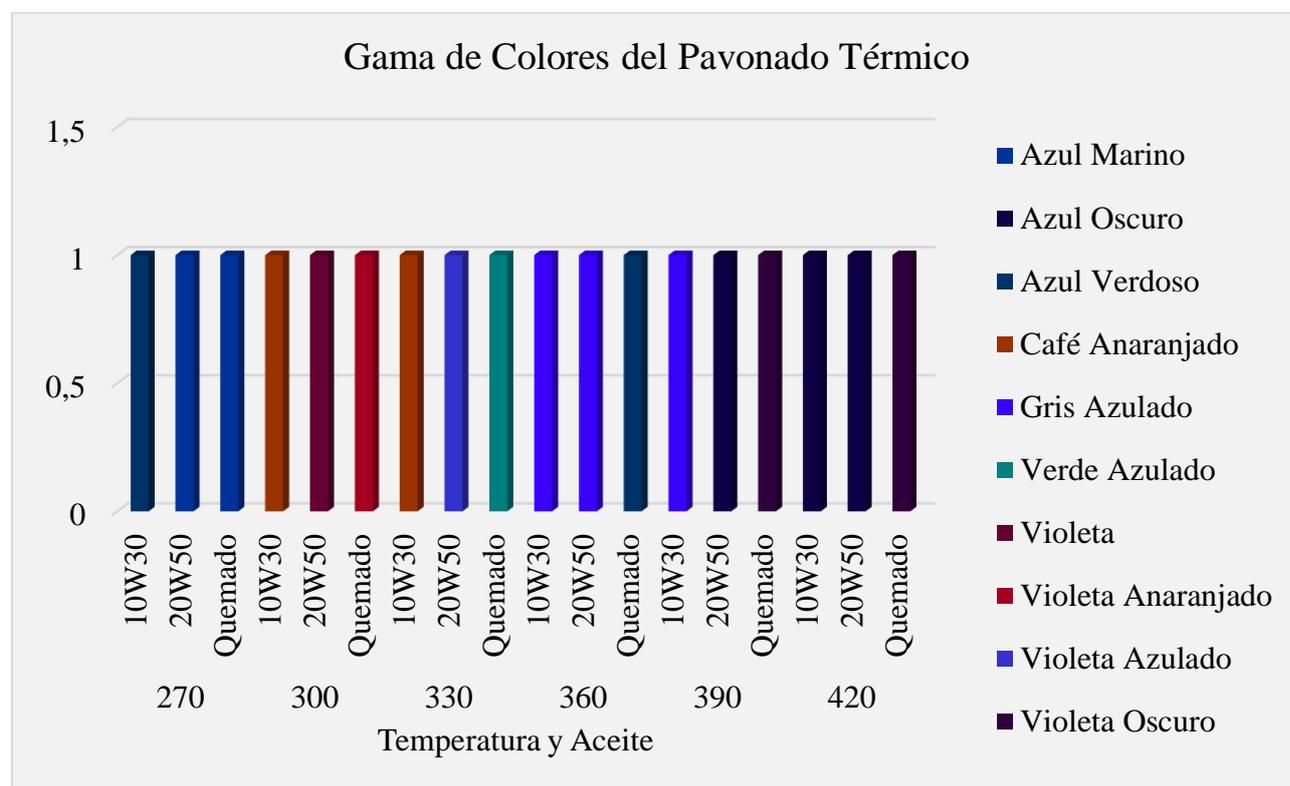
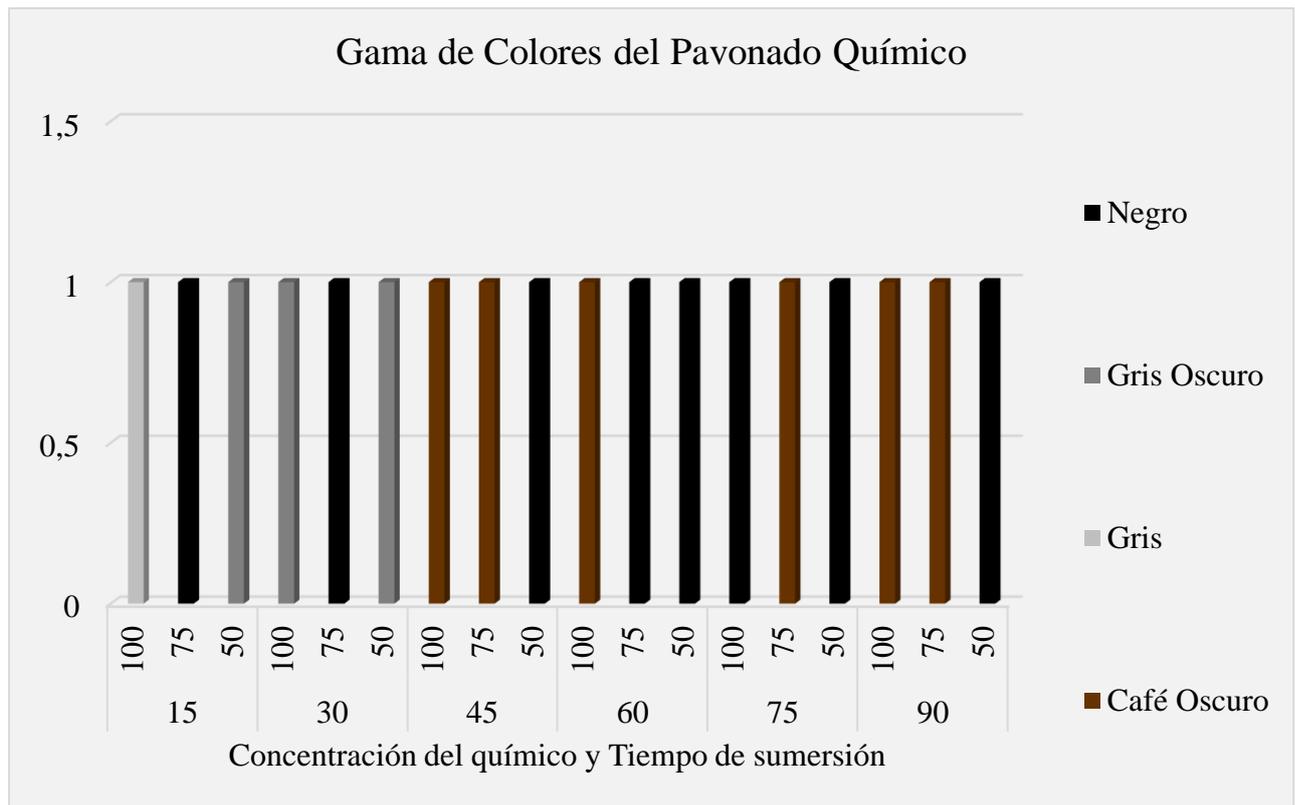


Figura 36:

Representación gráfica de los colores obtenidos en el proceso de pavonado químico



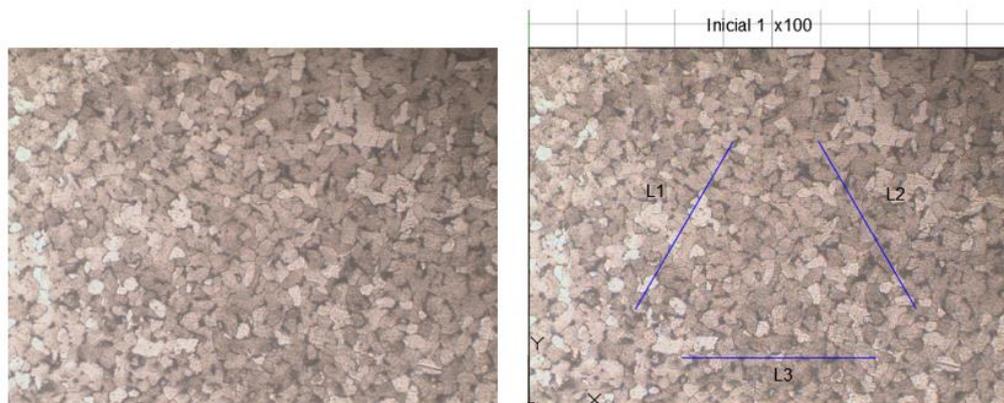
Como se observa en las figuras 35 y 36, a medida que aumentamos el valor de la variable de control en ambos procesos la tonalidad de las probetas se va oscureciendo. Lo que se puede asumir como una mayor adherencia y formación de la capa de óxido en la superficie.

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. En la figura 37 se puede observar a los granos y la composición que tiene el acero utilizado para las probetas, en la misma figura 37 se añadieron líneas que se interceptan con los granos, para de esta manera poder aplicar el método de intersección de líneas.

Figura 37:

Análisis del tamaño de grano por el método de intersección



Nota: Se tomaron 3 imágenes en distintas zonas de la probeta

Con la ayuda del software AutoCAD se amplificó la imagen a una escala de 100 para tener una mejor concordancia con la escala de dibujo en las líneas. Las líneas utilizadas tienen una longitud de 40 mm, obteniendo así una longitud total de 120mm. Se procedió a realizar el conteo de granos que interceptan las líneas y se utilizó las ecuaciones 2 y 3, con lo cual se obtuvo los datos de la tabla 7.

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		
	14	12	13	39	32,500	6,757	6,922	0
	14	14	15	43	35,833	7,038		
A15	12	14	13	39	32,500	6,757		
	15	15	10	40	33,333	6,830	6,730	-2,766
	14	12	11	37	30,833	6,605		
A17	14	13	13	40	33,333	6,830		
	13	13	11	37	30,833	6,605	6,705	-3,127
	12	13	13	38	31,667	6,682		
Ampliación	100							

Nota: El primer valor de variación es cero debido a que se comparó consigo mismo

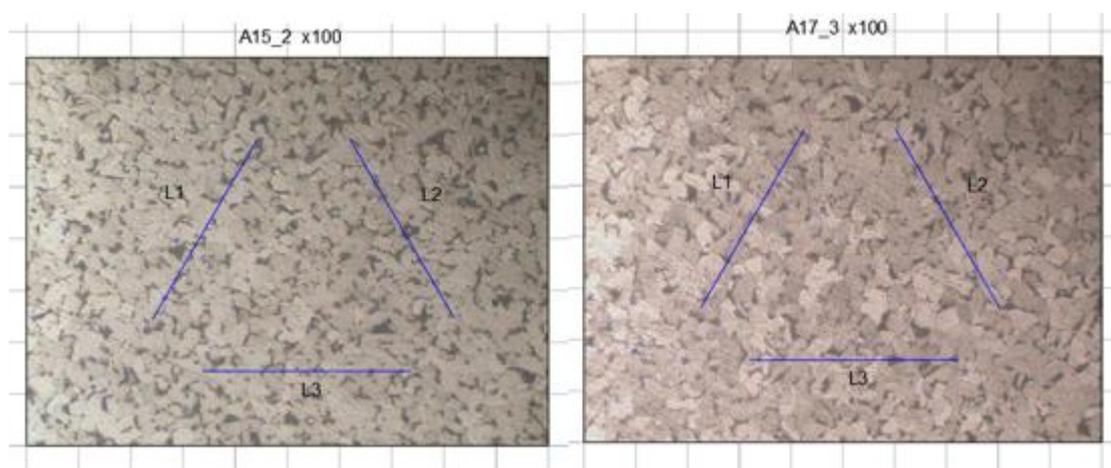
Como se ve en los datos de *% variación* de la tabla 7, el valor máximo de variación del tamaño de grano es de -3.12%. Los valores del promedio del valor G indican que no

existe una variación significativa en el tamaño de grano, y como dichos valores se obtuvieron de las probetas con un valor de temperatura de trabajo alto se puede descartar que exista una variación mayor en probetas con temperaturas de trabajo menor.

Además, en la tabla 7 se observa una tendencia decreciente, que está en concordancia con la teoría de deformación, ya que a medida que la temperatura aumenta el tamaño de grano se reduce. En la figura 38 se puede observar la micrografía de las probetas A15 y A17, de igual manera con las líneas de intersección distribuidas de la misma manera que en la fotografía del acero inicial.

Figura 38:

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



Nota: La figura de la probeta A15 es la segunda muestra obtenido y de la probeta A17 es la tercera

Resultados del ensayo de Dureza

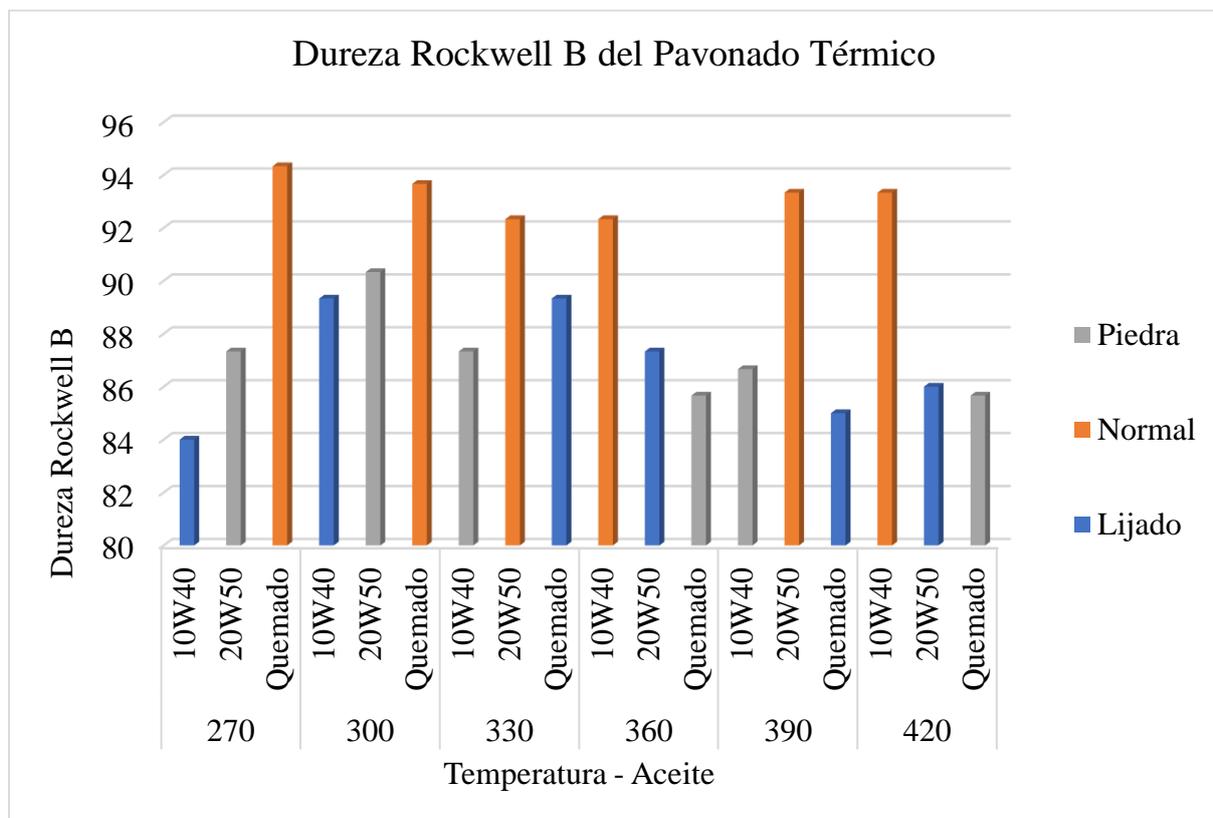
Dureza del pavonado térmico

Los resultados completos del ensayo de dureza se muestran en la tabla de los anexos 3. Para una mejor comprensión se muestran la figura 39, en las cuales se observa con mayor facilidad el comportamiento de la dureza.

En la figura 39 se puede observar un decrecimiento de la dureza a partir de la temperatura de 300 °C cuando trabajamos con la superficie lijada y rectificada en piedra. Mientras que para el acabado superficial normal se registró un aumento de la dureza con respecto a la original y un comportamiento estático.

Figura 39:

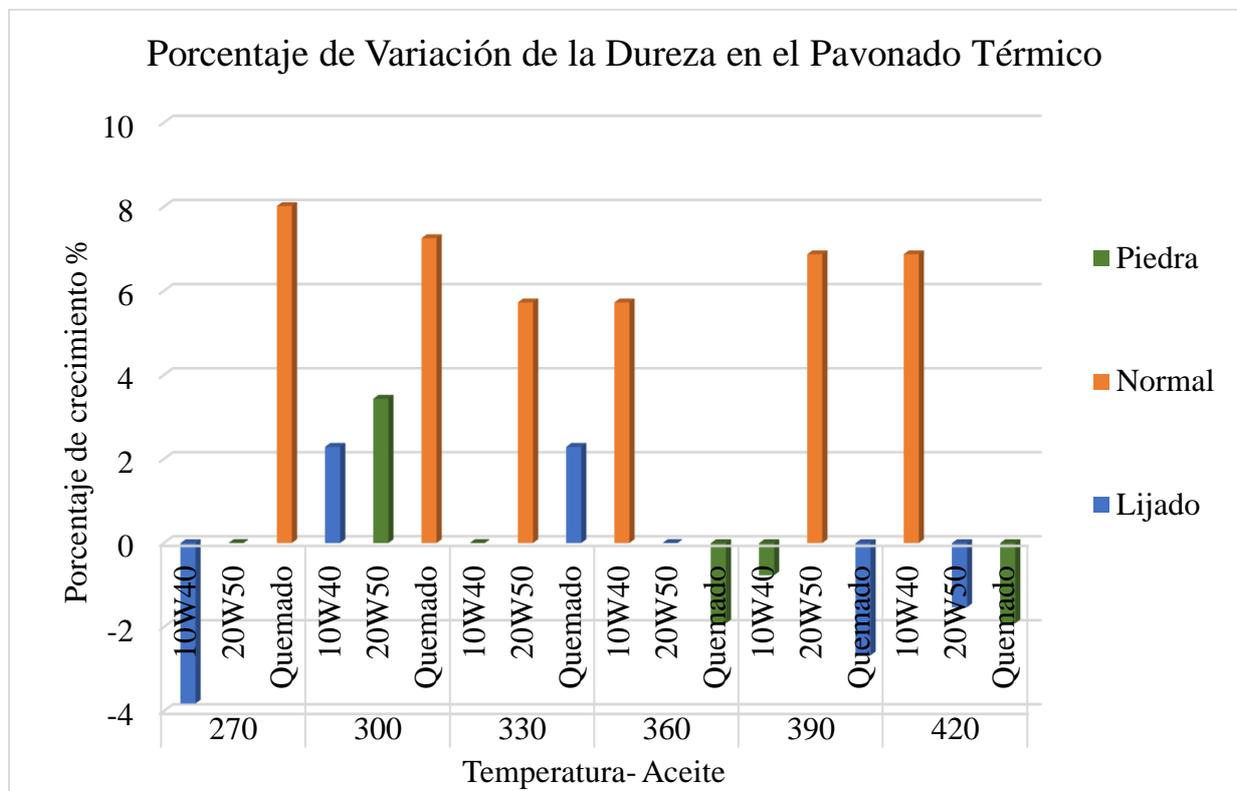
Comportamiento de la dureza superficial de las probetas después de ser aplicado el pavonado térmico



En comparación con la dureza inicial del acero, en la figura 40 se puede observar el porcentaje de crecimiento o decrecimiento que se dio en las probetas que fueron aplicadas el pavonado térmico.

Figura 40:

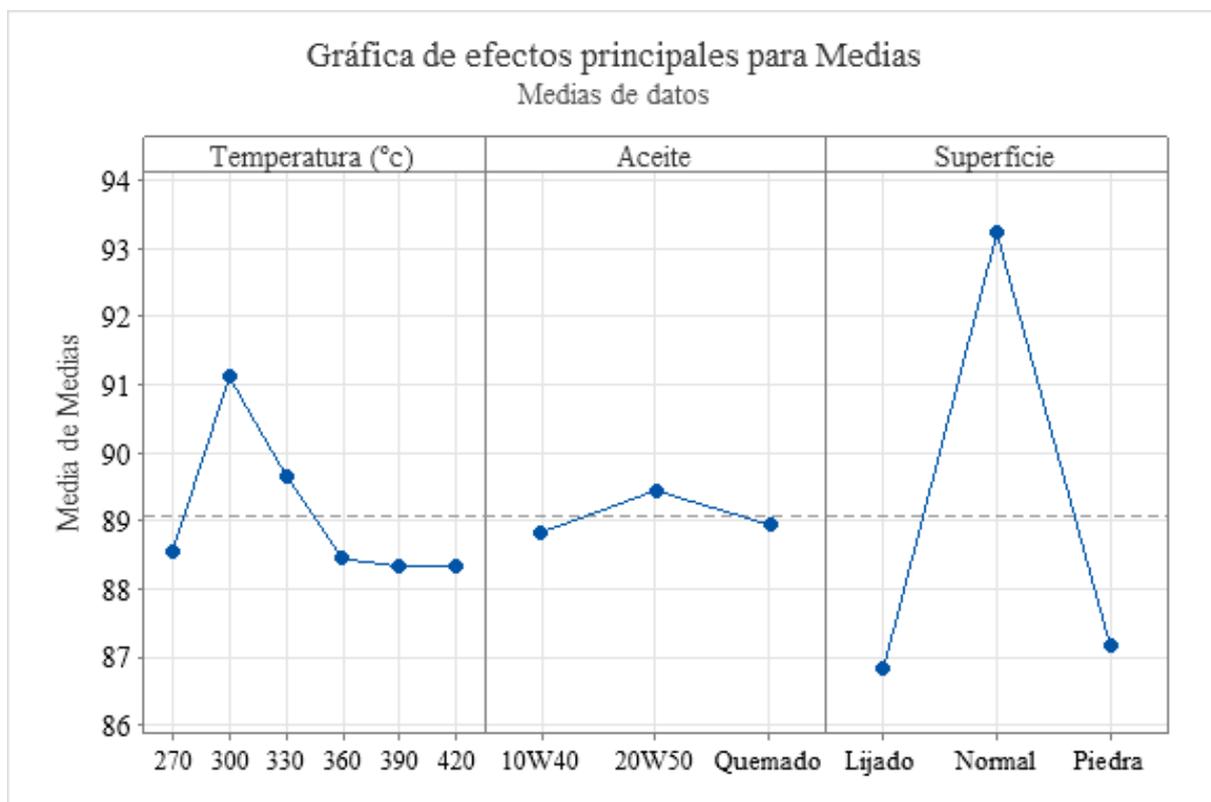
Crecimiento y decrecimiento de la dureza en el pavonado térmico



Para determinar de mejor manera la relevancia de cada factor que interviene en el pavonado se utilizó el software MiniTab para realizar un análisis de Taguchi y ANOVA. En la figura 41 se observa como influyen en la dureza: la temperatura, superficie y aceite en el pavonado térmico por separado.

Figura 41:

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



En la figura 41 se observa que para los cambios más relevantes de dureza influye la temperatura de 330°C y el tipo de superficie del acero. Se realizó un análisis ANOVA para observar la influencia de estos eventos. Todos los análisis realizados se los efectuó teniendo como hipótesis nula: todas las medias son iguales, y de hipótesis alterna: no todas las medias son iguales, además de un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Para el factor de temperatura se usó la información de la tabla 8, en donde se muestra si existe alguna diferencia significativa entre las medias de cada temperatura, lo cual no es cierto ya que según la información mostrada todas pertenecen a un mismo grupo.

Tabla 8:

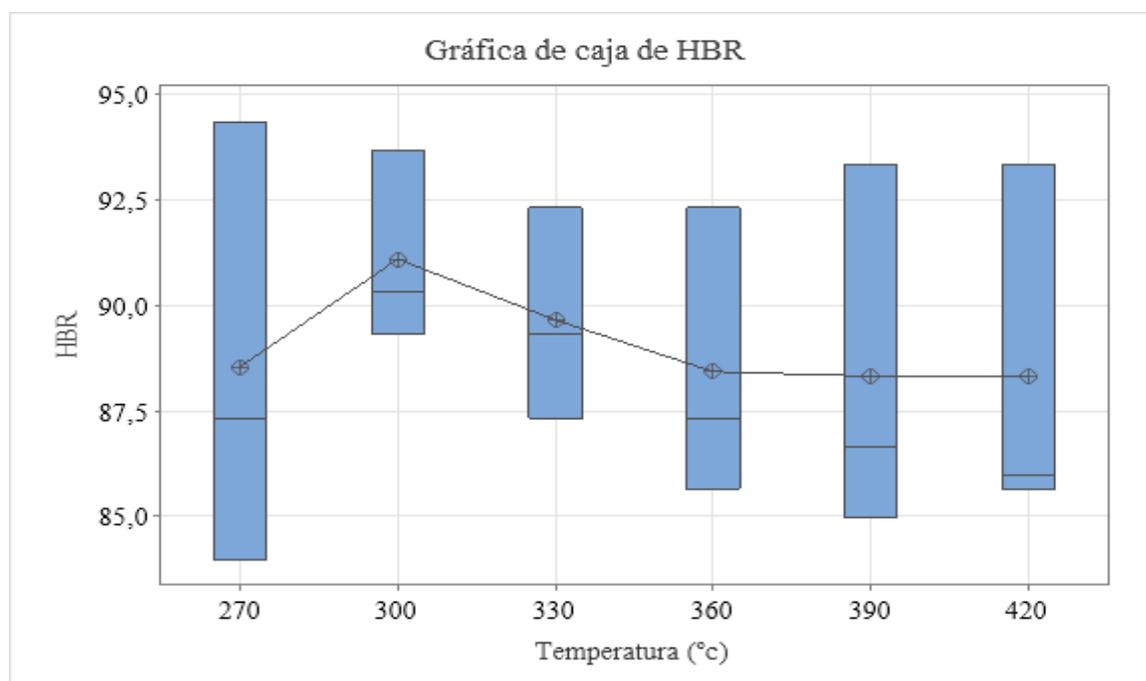
Agrupación del factor temperatura según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con respuesta de dureza

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

En la figura 42 se observa de mejor manera el comportamiento de la dureza con respecto a la temperatura, en la cual se puede ver que para la temperatura de 300°C existe una mayor concentración de valores de dureza altos, y que en las demás temperaturas se tiene un rango muy amplio de datos. Dando a entender que a dicha temperatura el acero no adquiere su valor más alto de dureza, sino que su comportamiento es mucho menos aleatorio.

Figura 42:

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



En cuanto al factor de superficie se observa en la tabla 9 que existe una diferencia significativa del acabado normal. Según la figura 43 existe una diferencia notable en la dureza cuando la superficie del acero tiene un acabado normal, y como se ve en la figura 43 el estado de esta dureza tiende a aumentar y ser menos variable en su rango de crecimiento en relación al acabado lijado y con piedra de rectificar.

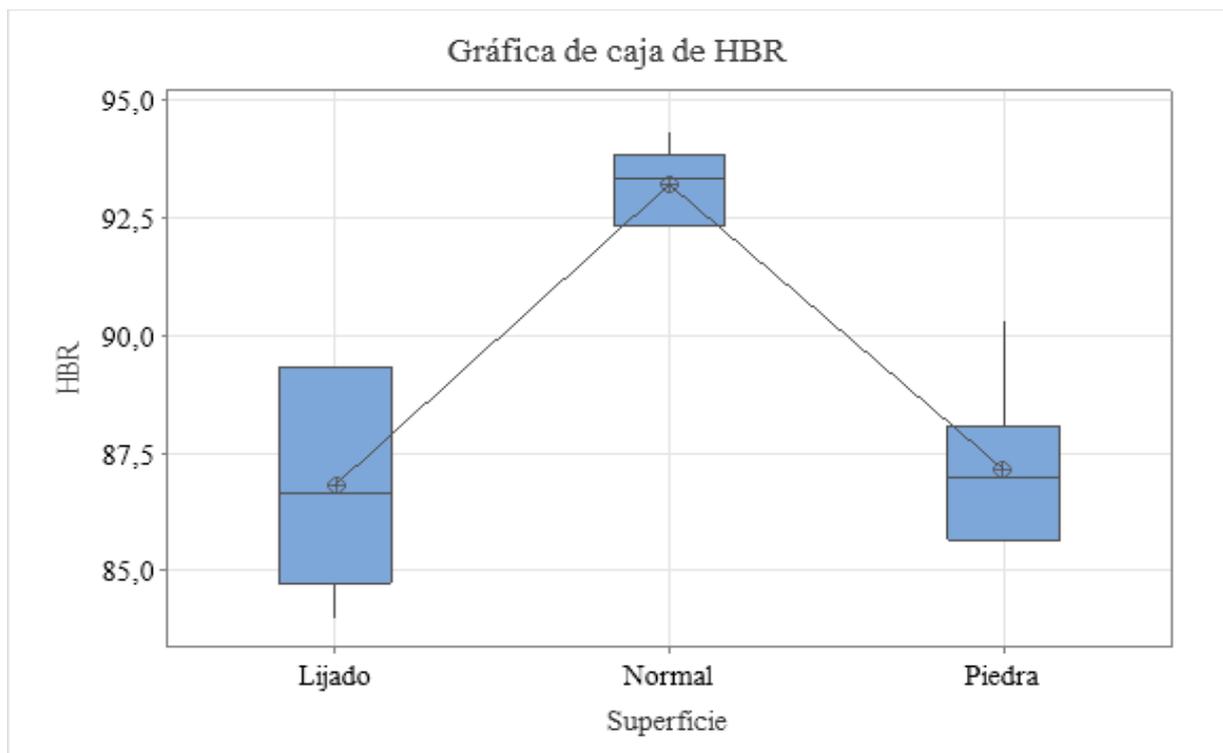
Tabla 9:

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 43:

Representación de caja de la dureza en el pavonado térmico en relación al acabado superficial



En la figura 44 de interacción de variables se puede obtener bastante información acerca del comportamiento de la dureza, los puntos importantes, es decir máximos y mínimos se los describe en la tabla 10.

Figura 44:

Interacción de factores del pavonado térmico con resultados de dureza

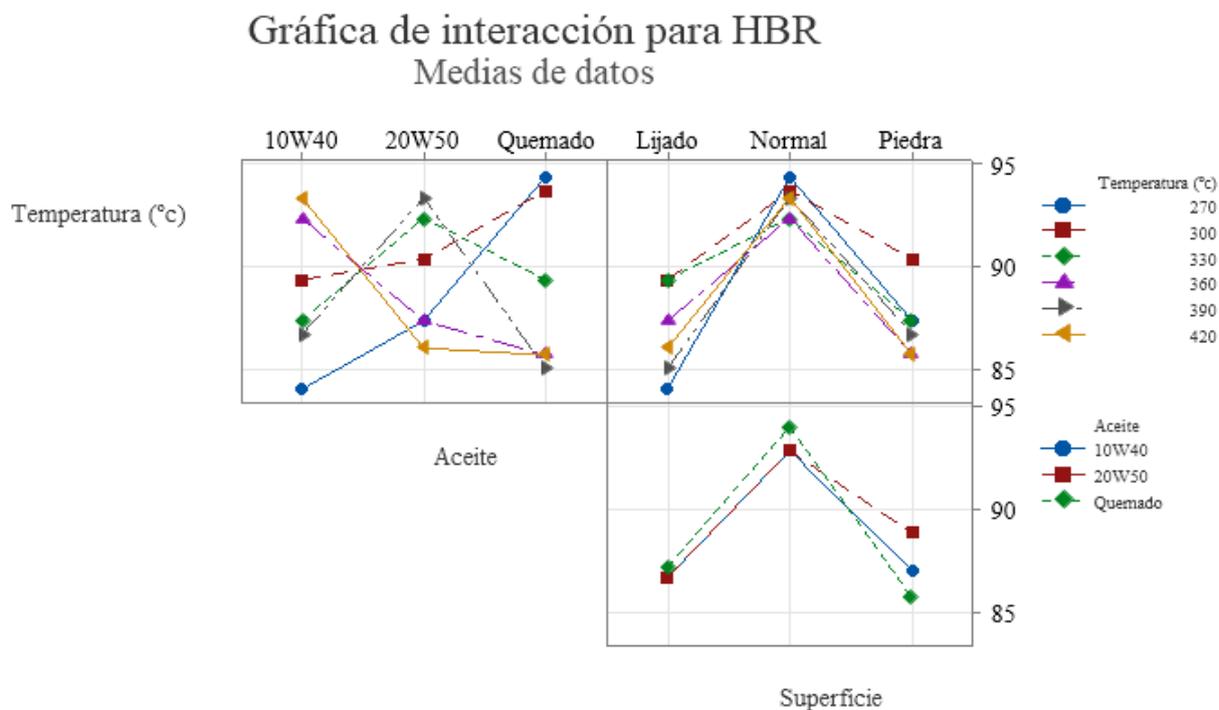


Tabla 10:

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	10w40	Lijado	84,000	-3,817
Cercano al V.I.	270	20w50	Piedra	87,330	-0,004
	330	10w40	Piedra	87,330	-0,004
	360	20w50	Lijado	87,330	-0,004

Nota: En este caso 3 ensayos obtuvieron una dureza similar al valor inicial del acero

Dureza del pavonado químico

Para la dureza del pavonado químico obtenemos un comportamiento similar al pavonado térmico, solo que en este caso todos los puntos de dureza superan al valor inicial,

como se ve en la figura 45. Y en la figura 46 se observa el porcentaje de crecimiento de la dureza que le dio el pavonado químico al acero.

Figura 45:

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

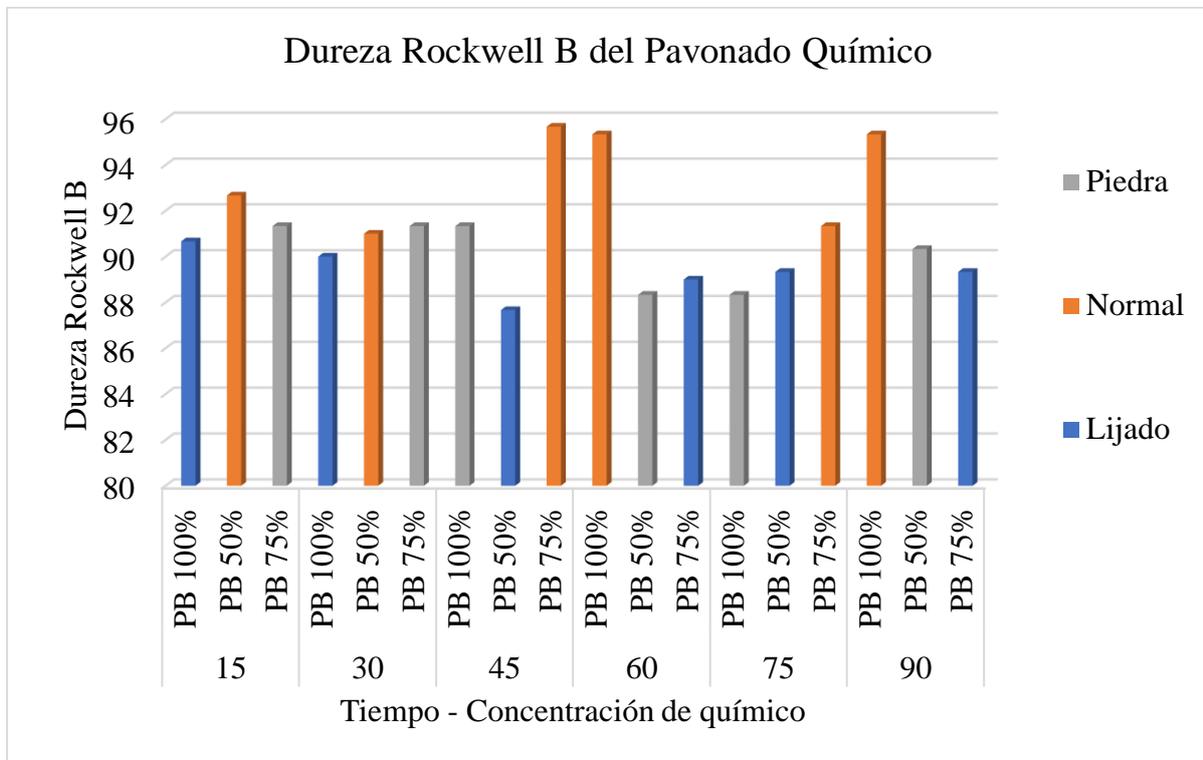
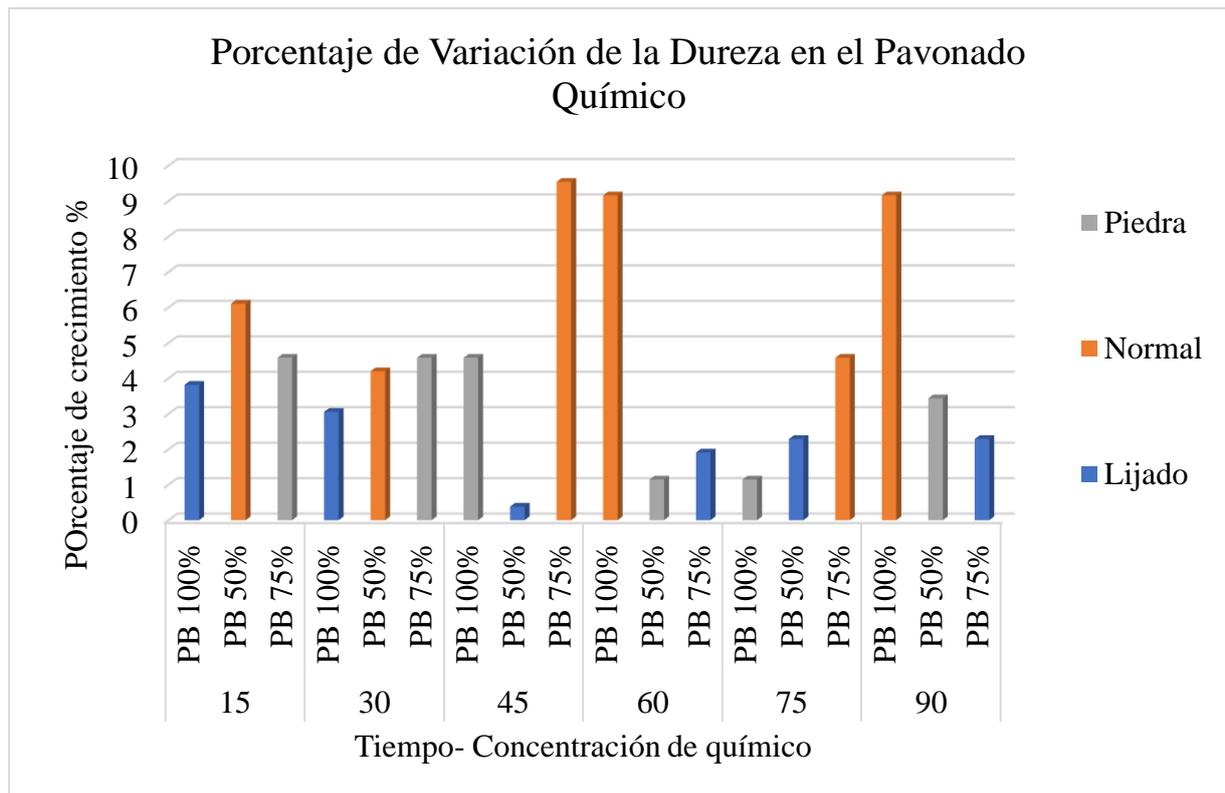


Figura 46:

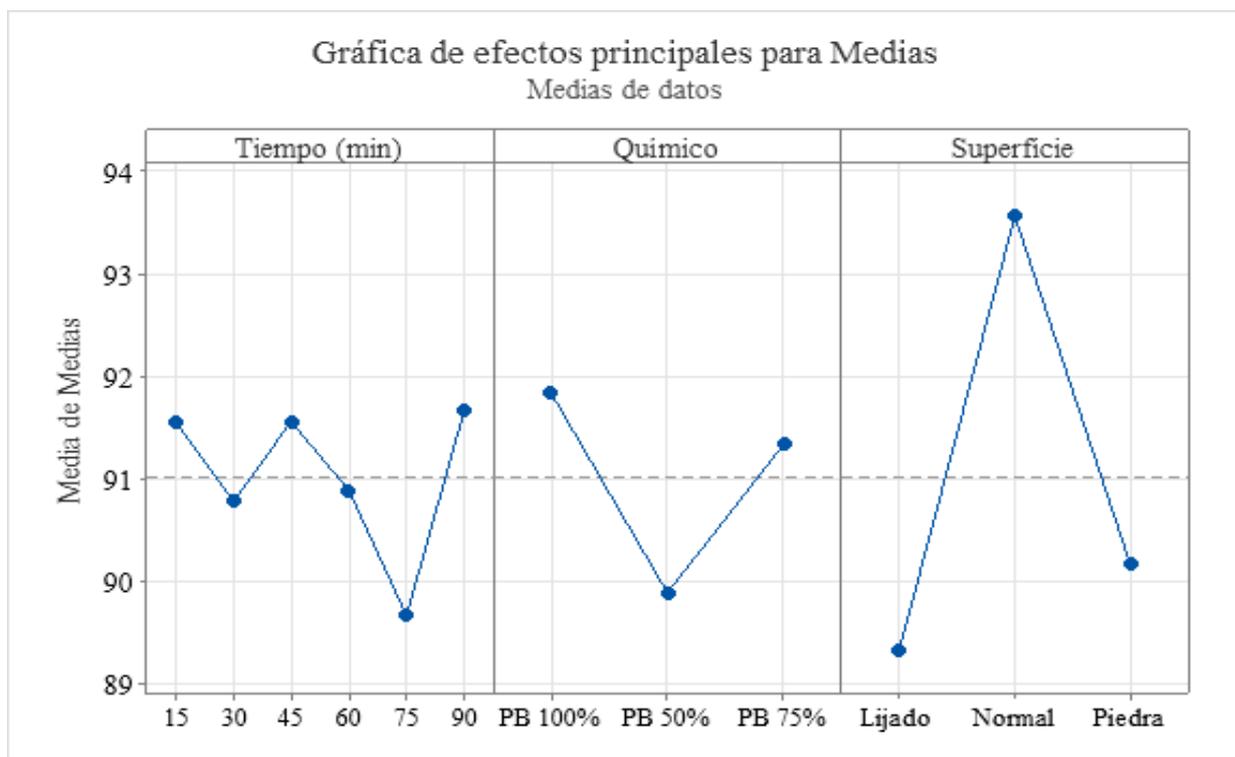
Crecimiento de la dureza en el pavonado químico



Aplicando el análisis de Taguchi se encontró los resultados de la figura 47, en la cual se pueden destacar tres eventos: los valores de dureza más bajos se encuentran cuando se trabajó con el 50% de concentración del químico y un tiempo de sumersión de 75 min, dando una idea de que esa es la combinación menos efectiva de pavonado químico en cuanto a dureza. El otro evento es, que al igual que en el pavonado térmico se tiene un aumento de la dureza cuando se trabaja con un acabado superficial normal.

Figura 47:

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



Con las mismas condiciones de análisis ANOVA del pavonado térmico se hicieron 3 análisis de un factor y uno de interacciones. La tabla 11 indica que para este caso no existe una variación significativa entre las medias de la dureza con el factor tiempo, es decir el evento de sumersión a 75 minutos no es relevante para el cambio en la dureza.

Tabla 11:

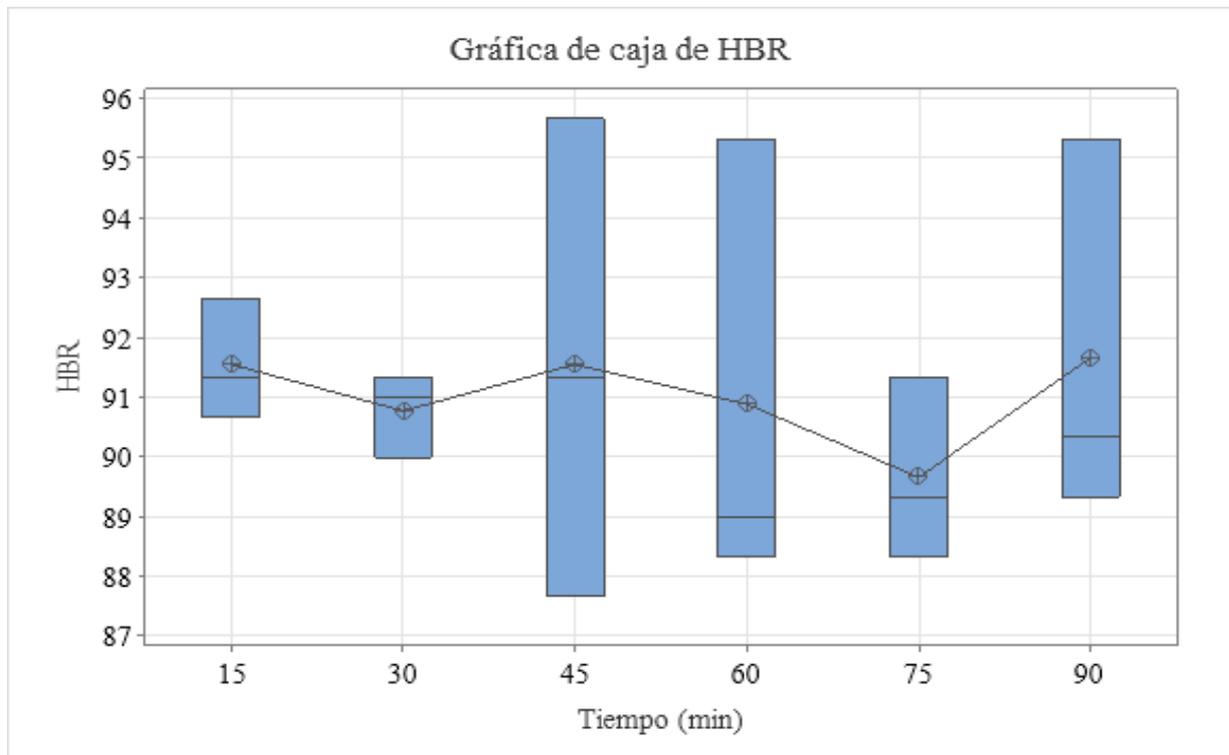
Agrupación del factor tiempo según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con resultado de dureza

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

Y como se observa en la figura 48, dicho evento se debe a una concentración de datos mínimos en dicho tiempo.

Figura 48:

Representación de caja de la dureza en el pavonado químico en relación al tiempo de sumersión



De igual manera para el segundo evento, según el análisis realizado y la tabla 12, se muestra que el cambio mostrado no es significativo en cuanto al rango de dureza obtenido, en cambio sí es relevante observar que a menor concentración del agente químico la dureza va disminuyendo.

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

Para el tercer evento se muestra que el factor de acabado superficial normal altera en gran parte a la dureza superficial, como se ve en la tabla 13. Pero a diferencia del pavonado térmico, en este tipo de acabado existe mayor dispersión de datos alrededor de la media, como se ve en la figura 49, también se observa que la concentración de datos se lo obtiene en el acabado superficial lijado.

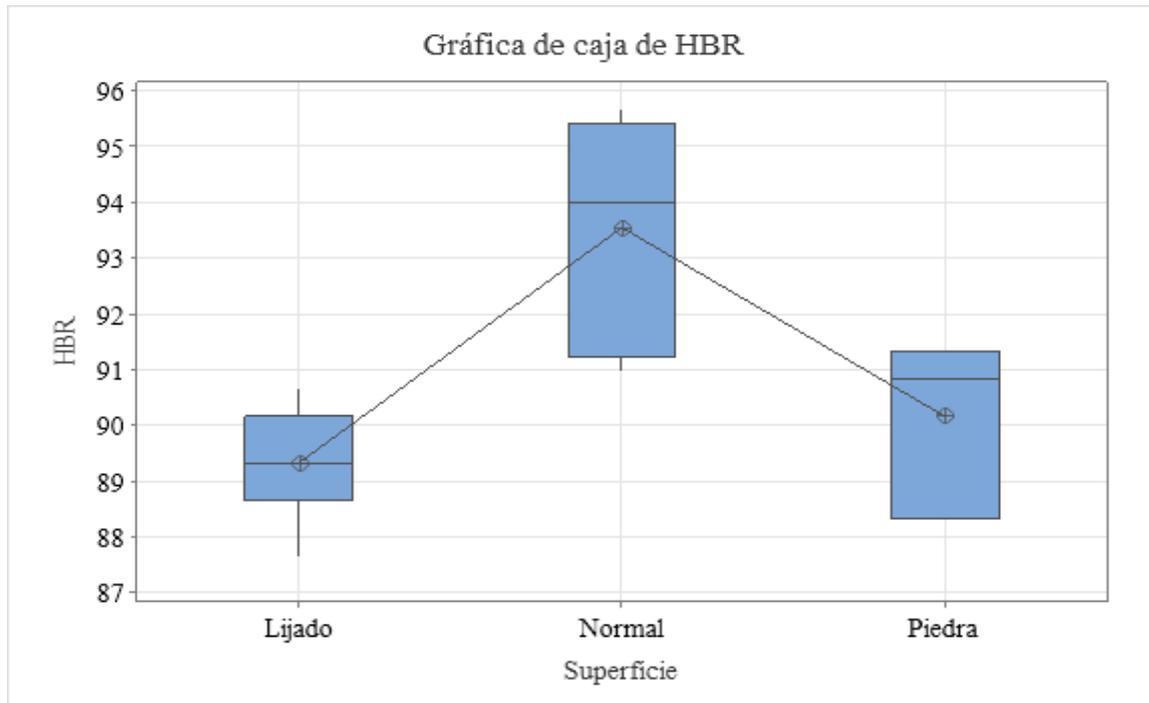
Tabla 13:

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 49:

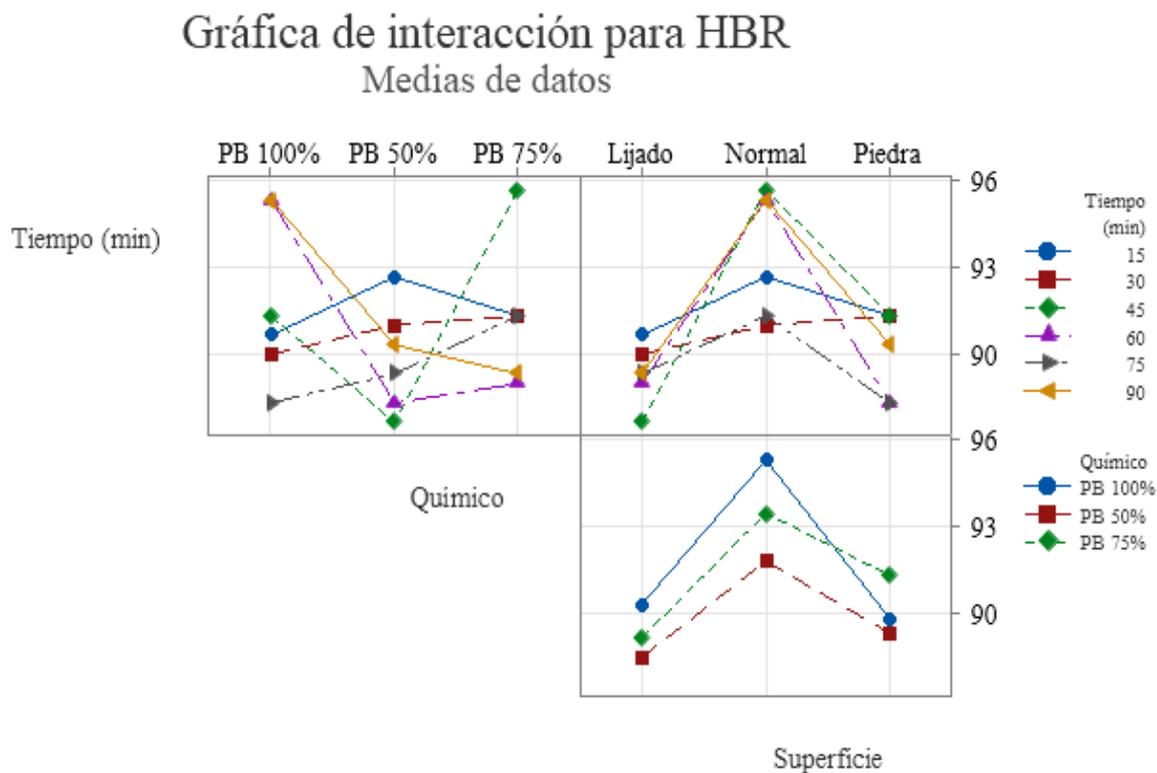
Representación de caja de la dureza en el pavonado químico en relación al acabado superficial



La interacción de los tres factores del pavonado químico se lo puede observar en la figura 50, destacando de igual manera los puntos más relevantes en la tabla 14. En el pavonado químico la diferencia más notable es que la dureza incrementó en todas las combinaciones, dando a entender que la capa de óxido creada es mucho más uniforme y tiene mejor adherencia que la capa formada en el pavonado térmico.

Figura 50:

Interacción de factores del pavonado químico con resultados de dureza

**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

Comparación de durezas obtenidas en ambos procesos

Para poder realizar una comparación entre los dos tipos de pavonado con respecto a la dureza final de las probetas se procedió a analizar el resultado en base al acabado superficial de las probetas, ya que este es el factor común entre los dos procesos.

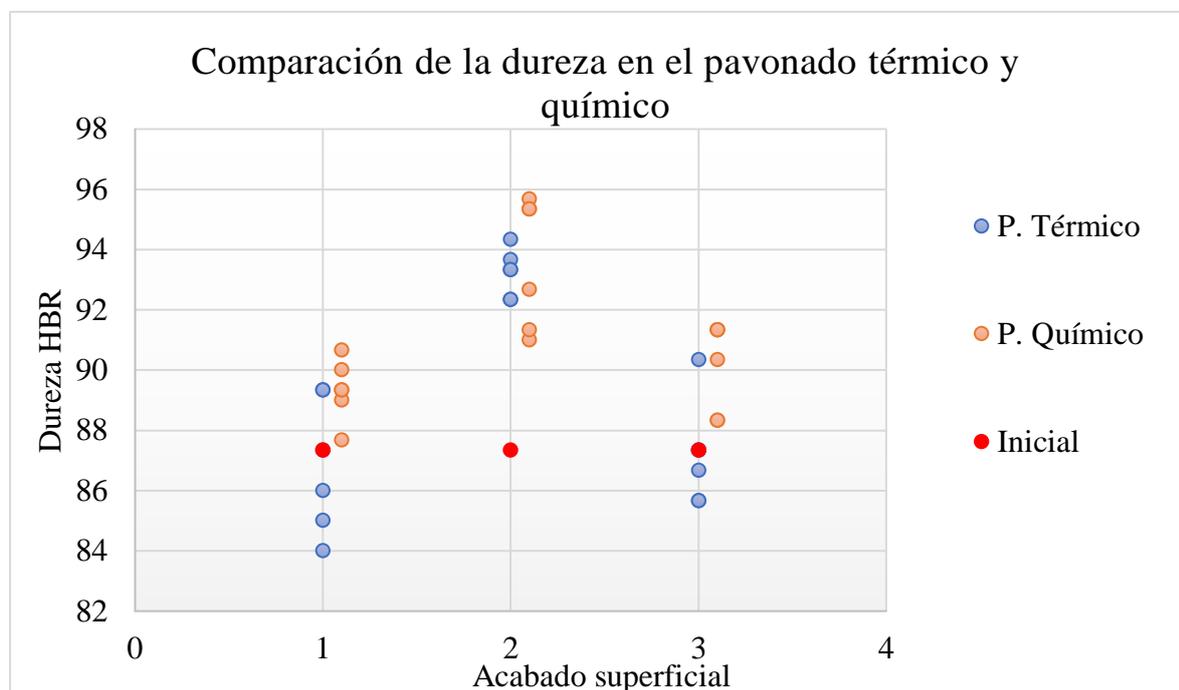
Como ya se mostró en las tablas 10 y 14, los valores máximos y mínimos no superan el 10% del valor original de la dureza. Esto indica que cualquiera de los dos procesos de

pavonado sirve para el trabajo de recubrimiento en el cual la dureza del acero sea un factor decisivo.

En la figura 51 se puede observar de mejor manera la relación que tienen los dos tipos de pavonados en su respectivo acabado superficial. Como ya se mencionó posteriormente el pavonado químico aumenta la dureza superficial del acero en un máximo de 10% y este valor depende en gran medida del acabado superficial que posea el acero, si no se requiere un aumento de la dureza la mejor opción es trabajar con un acabado superficial del tipo lijado.

Figura 51:

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

Rugosidad

La rugosidad es una consecuencia directa el acabado superficial, como ya se observó en la figura 10, gracias a los distintos procesos de manufactura podemos adquirir

varios tipos de rugosidad con un rango de valor amplio. Para el presente trabajo se usó 3 tipos de acabado superficial, los cuales son: normal, lijado y rectificado en piedra, los cuales corresponden a un valor de rugosidad ISO de N7, N5 y N5 respectivamente. En el siguiente análisis se determinó si existe alguna variación de la rugosidad después de que a las probetas se les aplicará su respectivo pavonado.

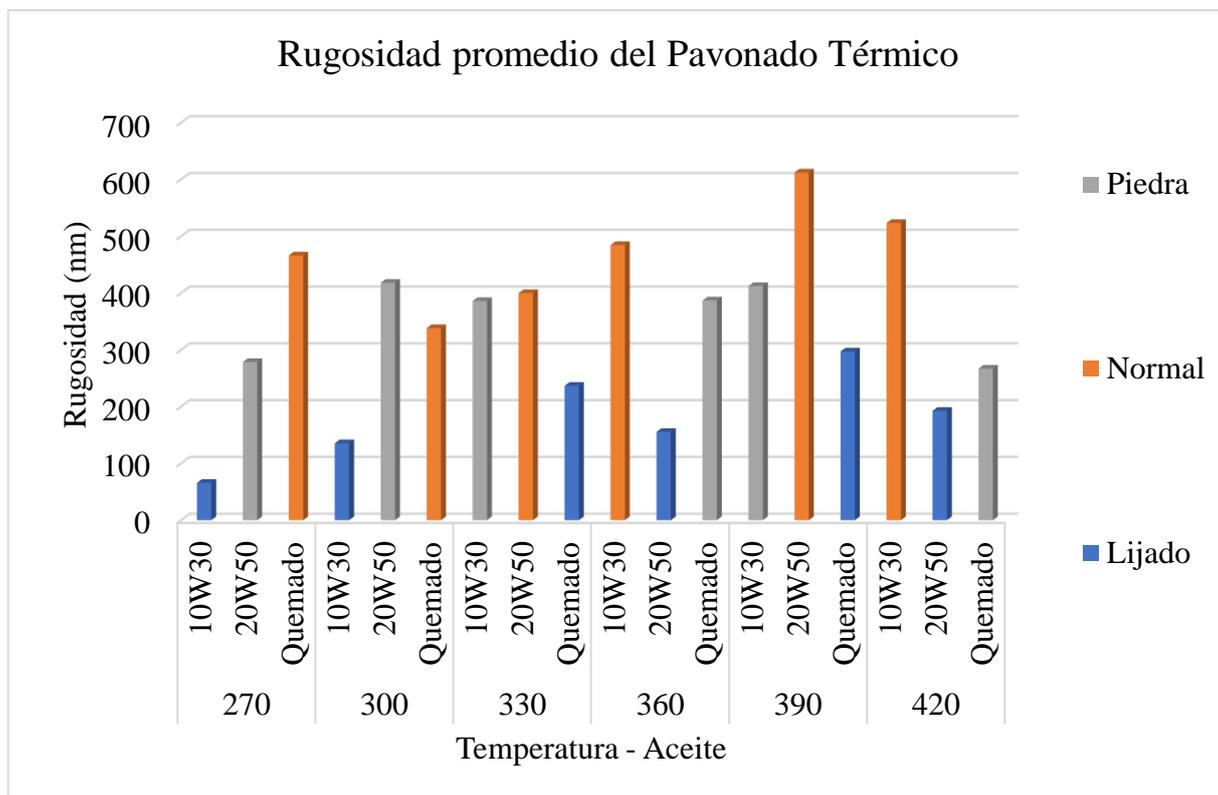
Por motivos ajenos a la investigación se realizó las pruebas de rugosidad en dos equipos diferentes, obteniendo los datos iniciales con un equipo de menor precisión.

Rugosidad del pavonado térmico

En el pavonado térmico existe una mayor probabilidad de que los picos de rugosidad observados en la figura 9 se deformen más y cambien totalmente. Si a esto se añade una reacción de oxidación creando una capa en toda la superficie, la rugosidad final se va a alterar en gran medida. Para observar de mejor manera el comportamiento de la rugosidad en el pavonado térmico se tiene la figura 52, en la cual se observa la rugosidad promedio en nanómetros según cada combinación de pavonado térmico.

Figura 52:

Comportamiento de rugosidad de las probetas después de ser aplicado el pavonado térmico



Para observar cómo varía la rugosidad respecto a su valor inicial se muestra la figura 53, todos los valores se compararon con una sola rugosidad inicial (respectivamente a su acabado superficial) ya que todos los grupos de probetas tuvieron el mismo mecanizado. Por otra parte, en la figura 53 se observa una comparación entre las rugosidades del pavonado y las iniciales en su respectivo acabado. Destacando los siguientes puntos:

- 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

Figura 53:

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

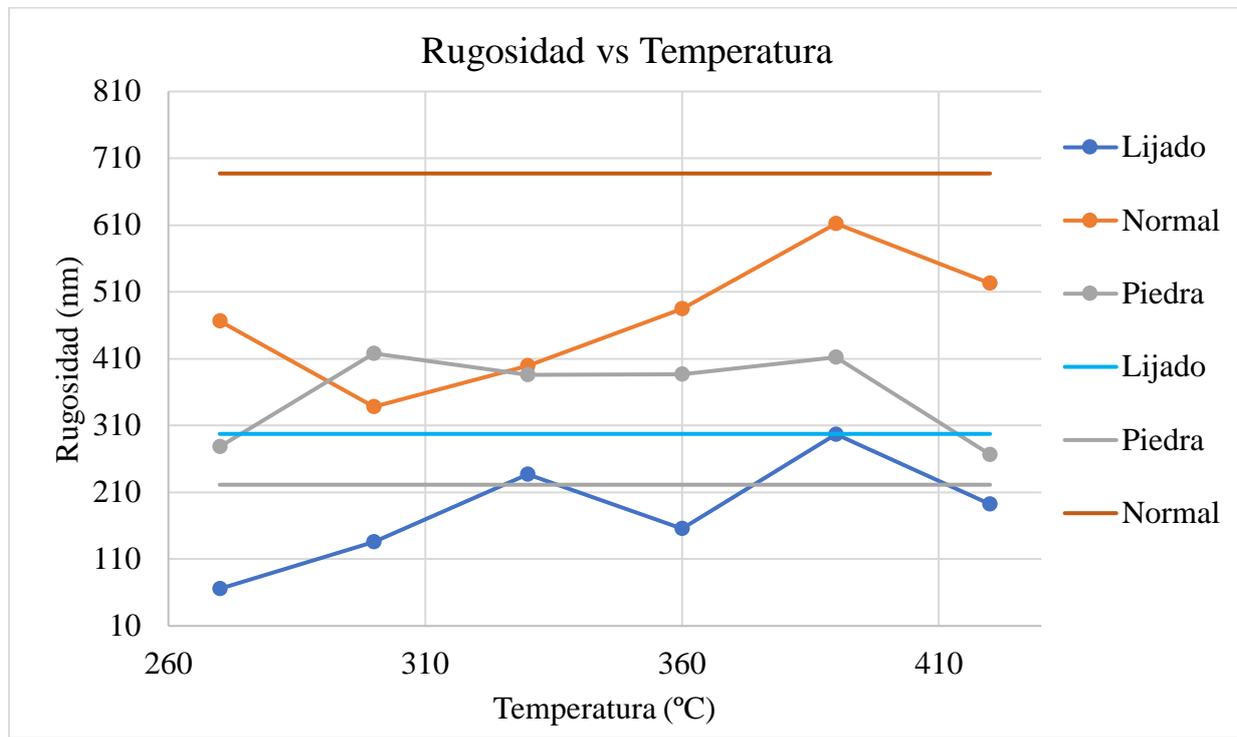
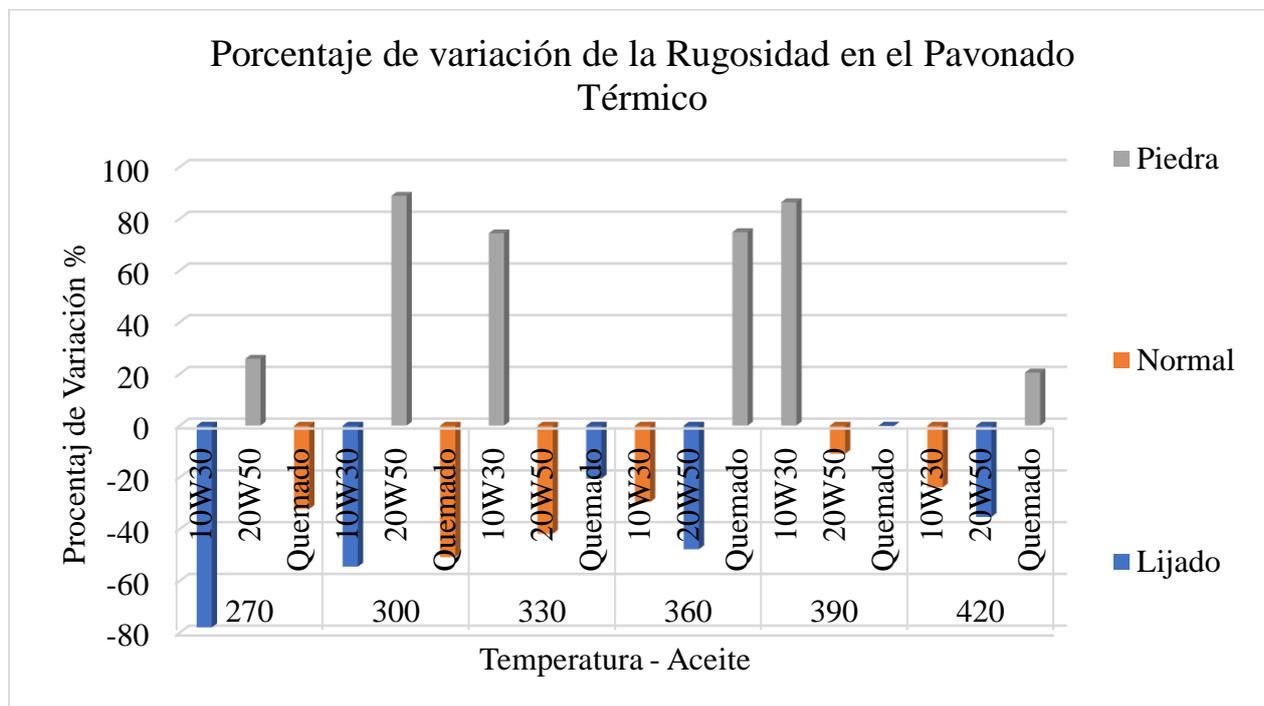


Figura 54:

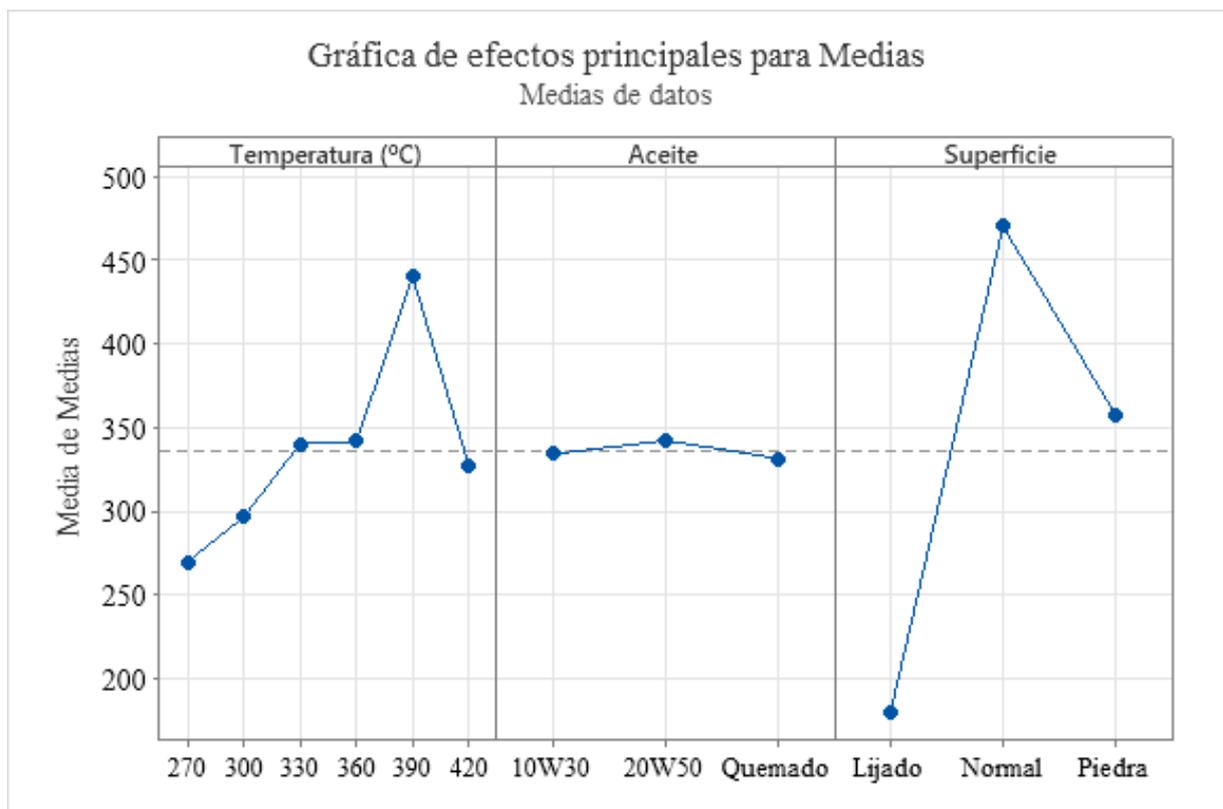
Crecimiento y decrecimiento de rugosidad en el pavonado térmico



Para determinar de mejor manera el comportamiento de la rugosidad en el pavonado térmico se realizó un análisis Taguchi y ANOVA. Teniendo así la figura 55 donde se observa el comportamiento de cada factor en la rugosidad de las probetas.

Figura 55:

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



Como ya se esperaba el factor más influyente en la rugosidad es el acabado superficial, por ende, un análisis extra solo verificaría lo obvio. Por otra parte, en la figura 55 se observa que existe una tendencia de crecimiento desde la temperatura de 270°C hasta los 390°C y después cae.

Tabla 15:

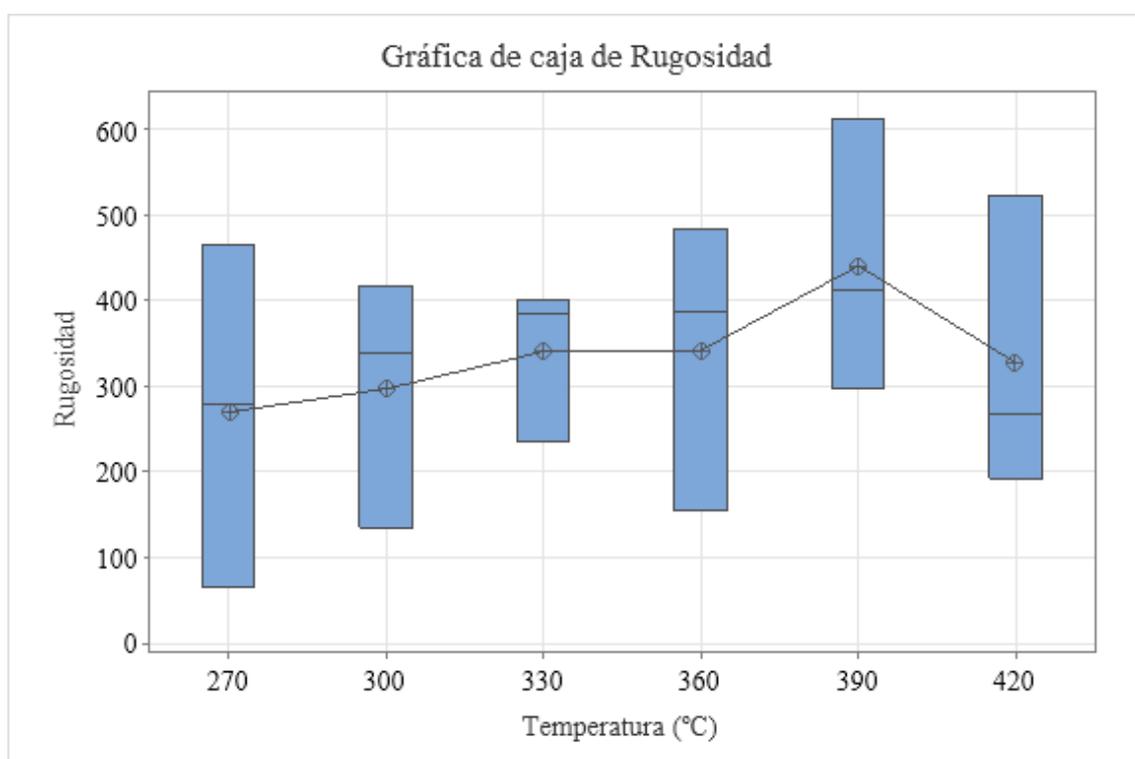
Agrupación del factor temperatura en la rugosidad según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con respuesta de rugosidad

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

Como se ve en la tabla 15, este crecimiento no representa un cambio inestable en la rugosidad, es decir que su crecimiento tiene una tendencia normal.

Figura 56:

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



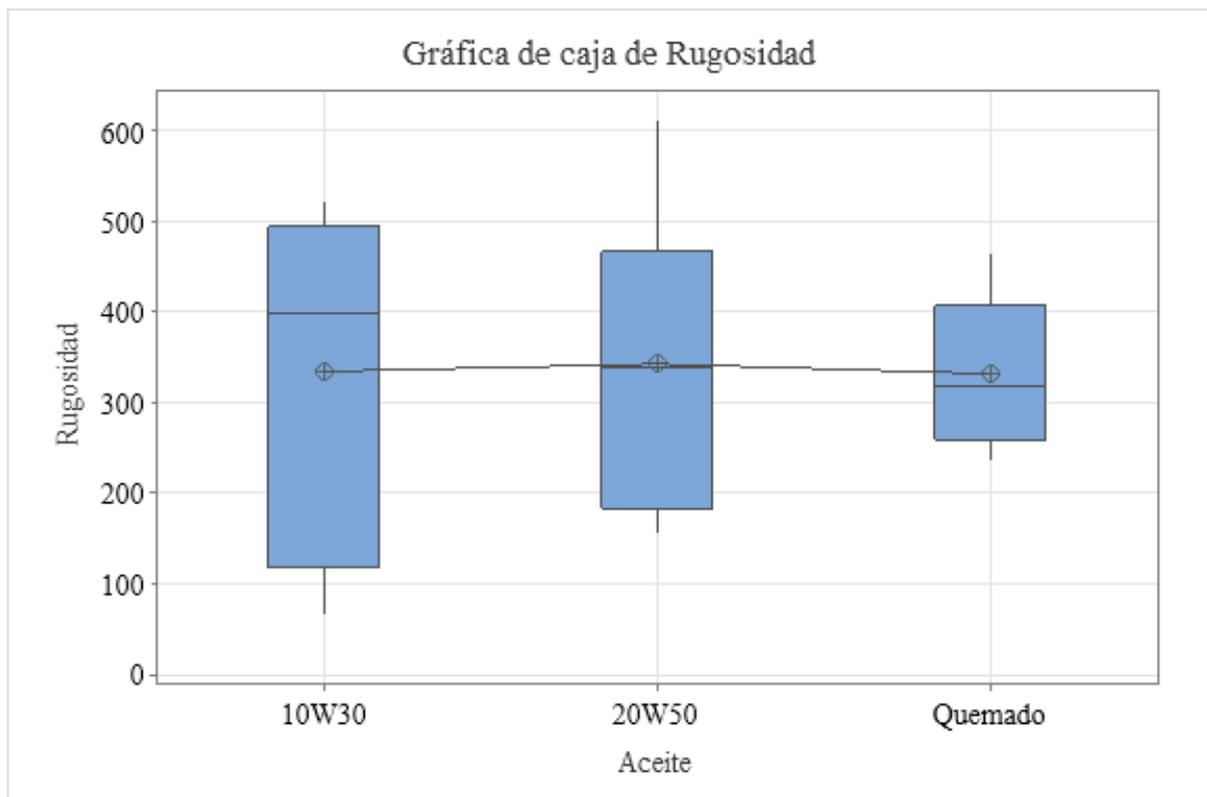
En la figura 56 se observa que cada temperatura presenta un rango amplio de rugosidad, con una tendencia creciente. Y como ya se mencionó a partir de los 390°C tiende a bajar, lo que da a entender que a partir de los 420°C la deformación de los picos de

rugosidad van aplanándose y se acomodan de mejor manera con la capa de óxido generada por el pavonado.

Por otra parte, en la figura 57 también podemos ver que el factor que menos afecta a la rugosidad es el tipo de aceite, sin embargo, se observa que el aceite que menos produce cambios radicales, es decir un rango de datos disminuido, es el aceite quemado.

Figura 57:

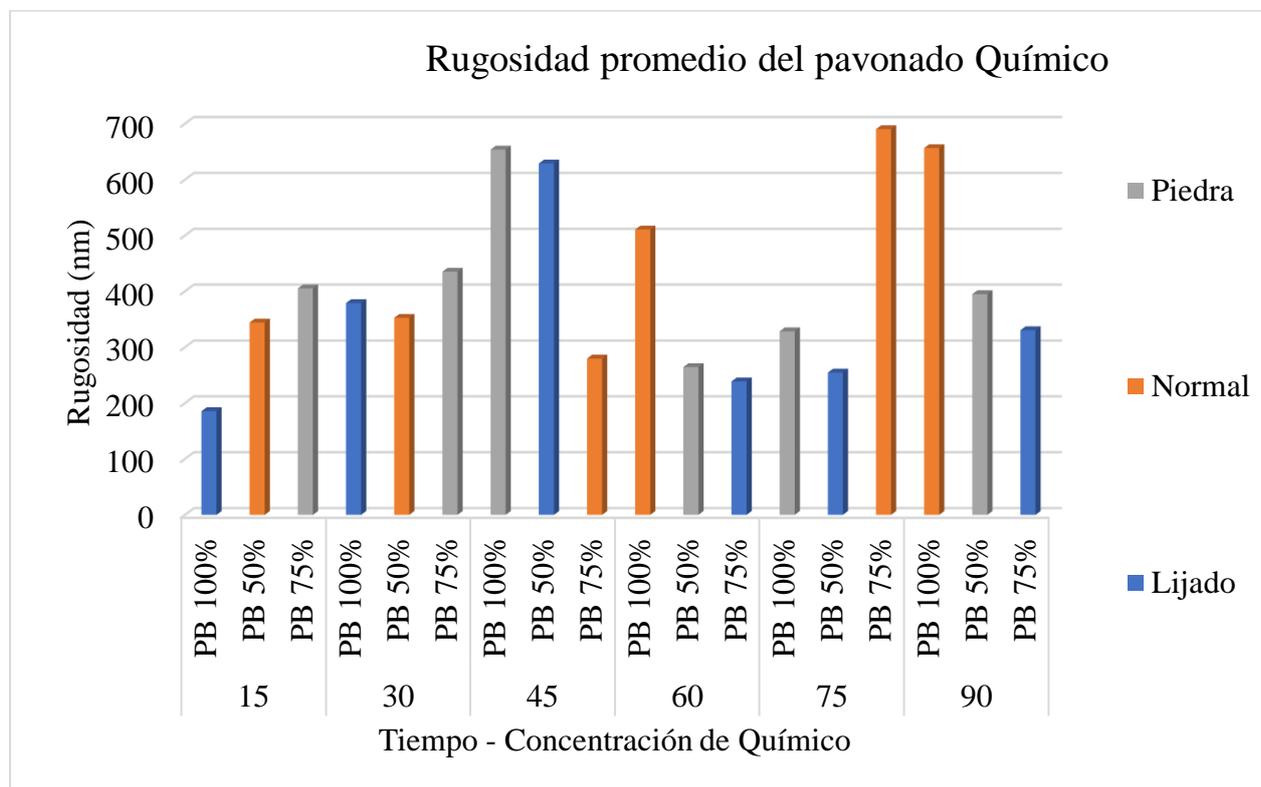
Representación de caja de la rugosidad en el pavonado térmico en relación al aceite usado



En la figura 58 se tiene la interacción de los factores para el pavonado, de la cual podemos obtener los datos de la tabla 16, los cuales son los máximos y mínimos de rugosidad alcanzadas en el pavonado térmico.

Figura 59:

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



De igual manera para comparar el comportamiento de la rugosidad con sus valores iniciales se tiene las figuras 60 y 61, en las que se observa los cambios de la rugosidad y su porcentaje de variación. En el caso de la figura 60 podemos destacar tres puntos:

- 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.

Figura 60:

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

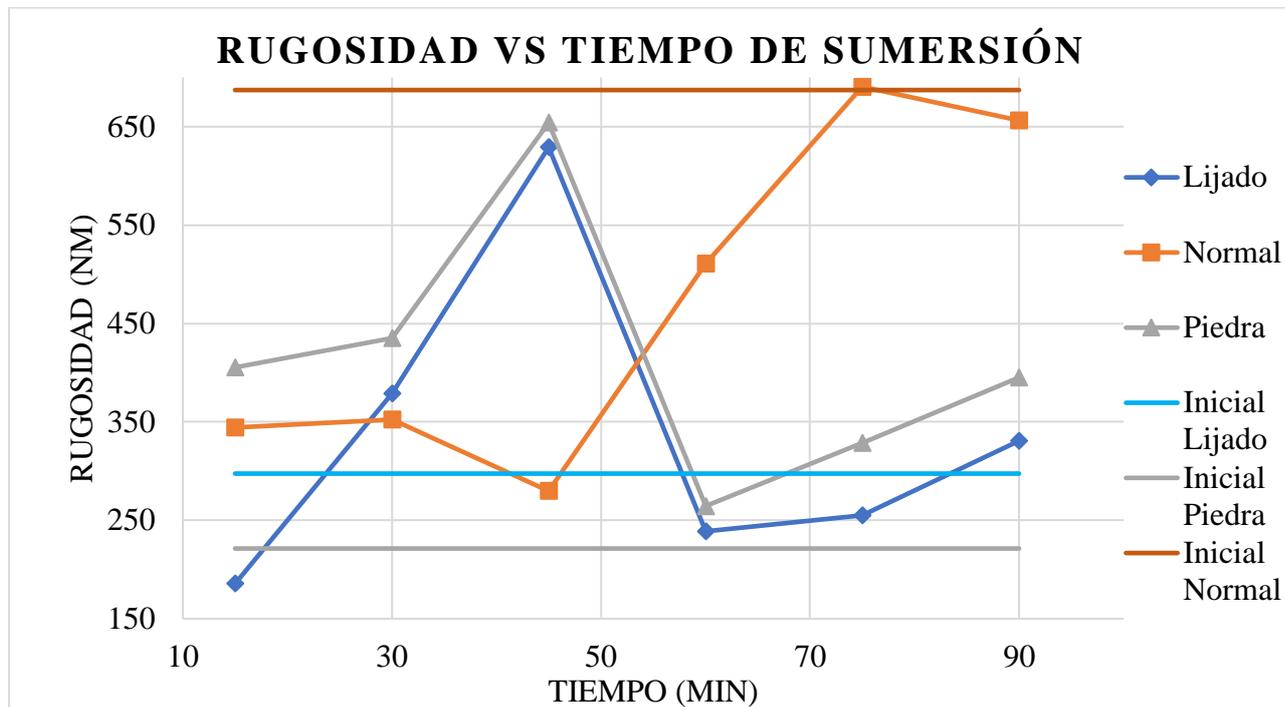
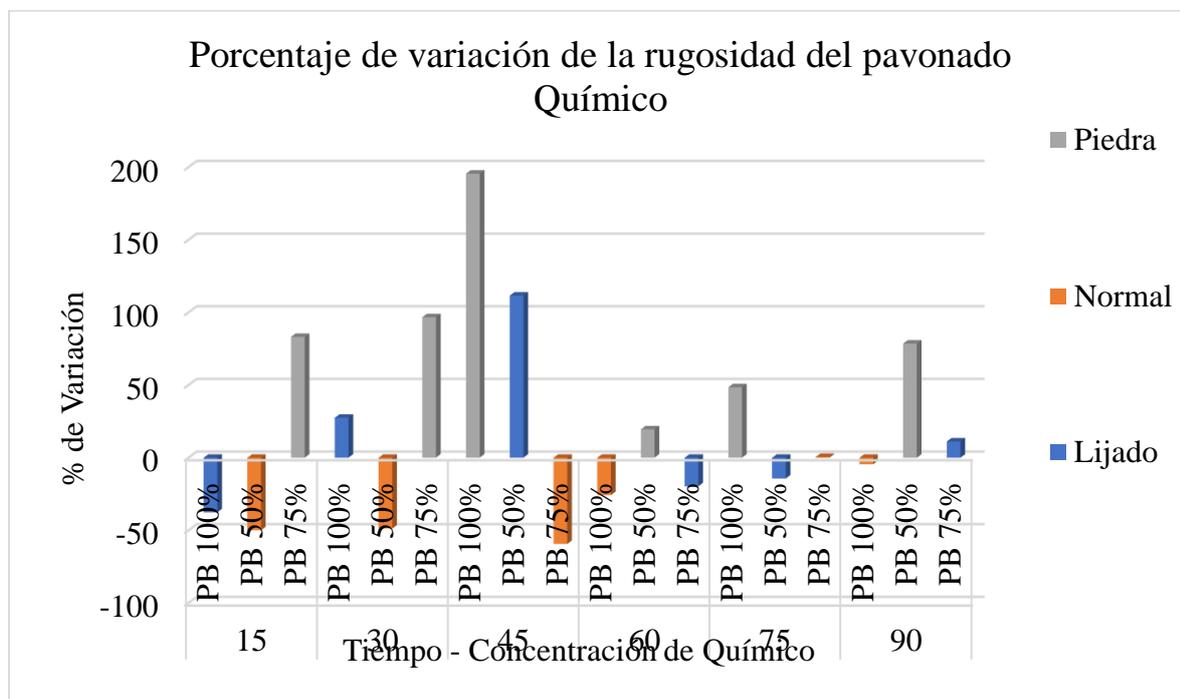


Figura 61:

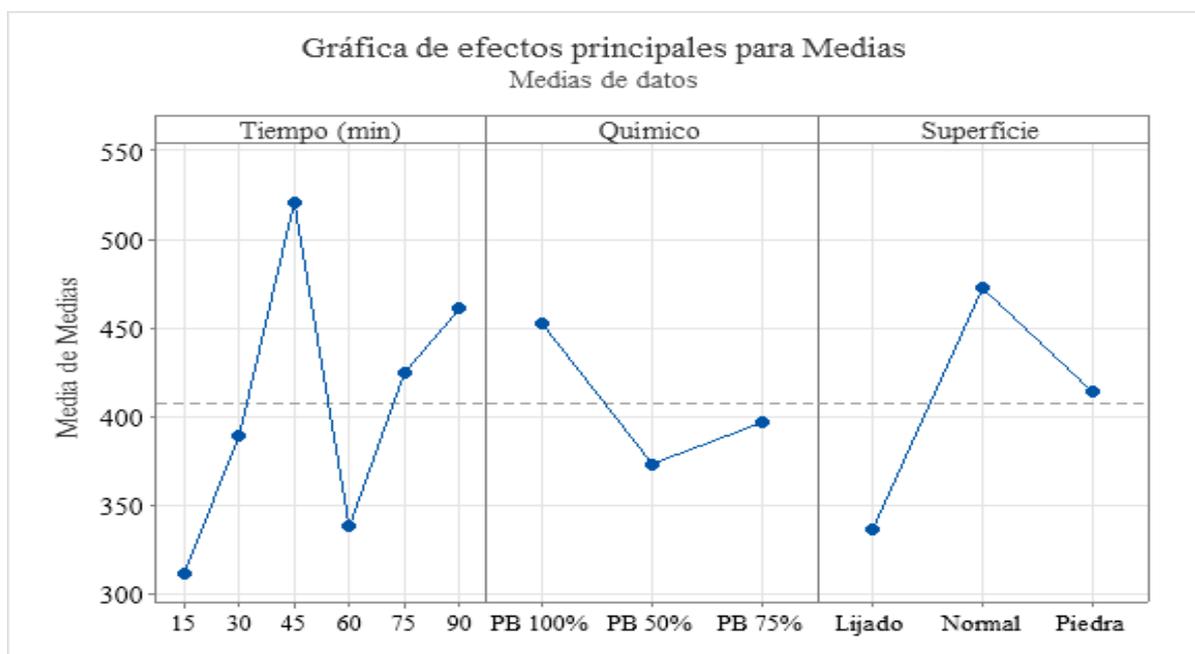
Crecimiento y decrecimiento de la rugosidad en el pavonado químico



Realizando un análisis de Taguchi se encontró que los tres factores intervienen en gran medida en la rugosidad, pero como el acabado es una consecuencia directa no se lo va a analizar tan profundamente. En la figura 62 se observa que para el tiempo de sumersión del pavonado existe un gran salto en los valores de rugosidad cuando se pasa de 45 minutos a 60 minutos, y para la concentración de químico se observa un decrecimiento en los valores de rugosidad.

Figura 62:

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



En el análisis del tiempo de sumersión se obtuvo la tabla 20, la cual nos indica que el salto obtenido en la figura 62 no es un evento anormal, sino más bien que en dichos puntos se tiene un comportamiento errático de la rugosidad.

Tabla 17:

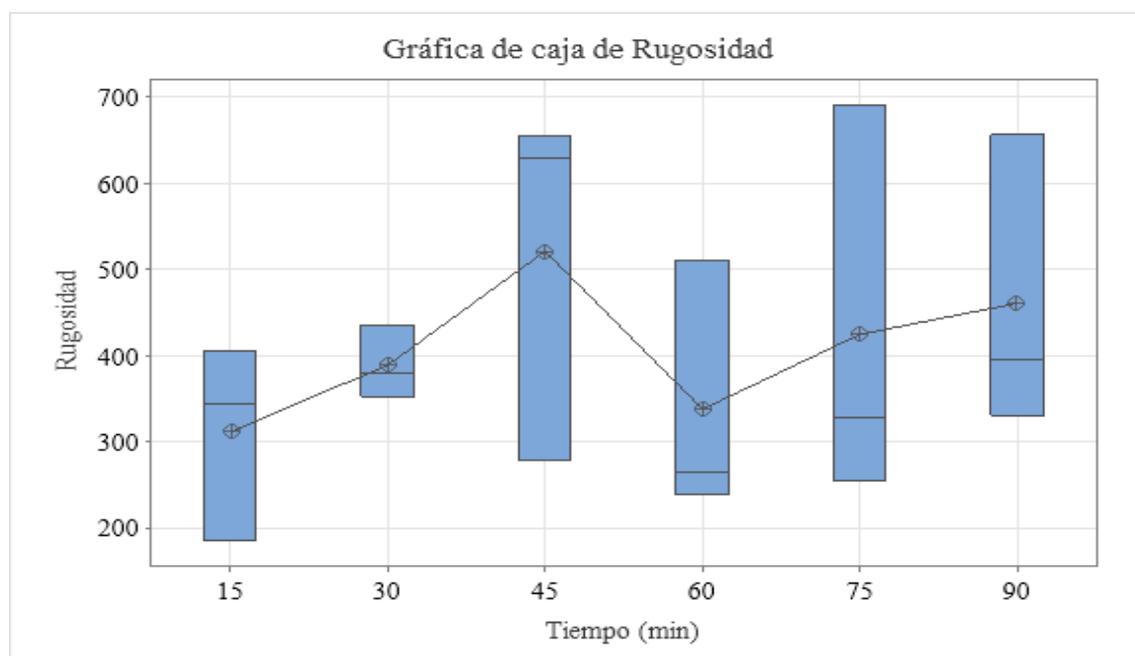
Agrupación del factor tiempo según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con resultado de rugosidad

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

El comportamiento errático se debe a que como se observa en la figura 63 el rango de datos aumenta a partir de los 45 minutos de exposición con el agente químico. Dando a entender que la reacción química producida en el pavonado está generando más componentes que la capa de óxido en la superficie y dichos componentes “mecanizan” de cierta manera al acero, provocando irregularidades sin similitud entre las combinaciones de factores.

Figura 63:

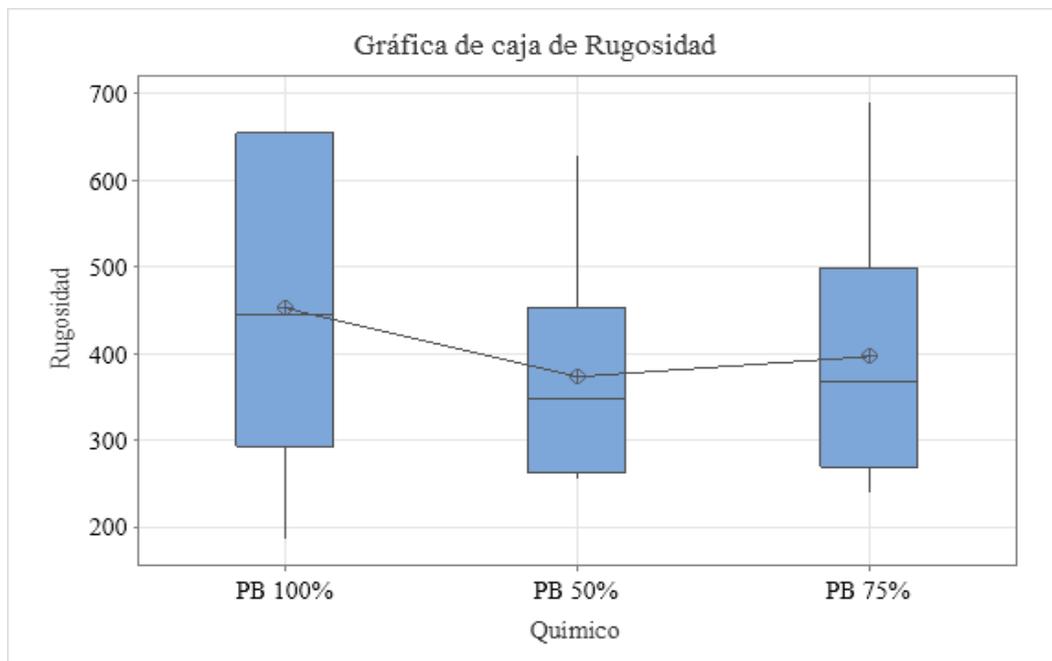
Gráfica de caja de la rugosidad en el pavonado químico en relación al tiempo de sumersión



En cuanto a la concentración del agente químico, en la figura 64 se puede observar que mientras menos concentración del agente químico se tenga en la solución menor es la rugosidad obtenida. Todas las concentraciones del agente químico presentan un valor mínimo similar, sin embargo, como se esperaba, a menor cantidad de agente químico la reacción es menor y por ende no deforma en gran parte al acero ni genera más componentes que aumenten a la rugosidad, esta concentración solo reacciona con lo necesario de acero para generar la capa protectora de óxido.

Figura 64:

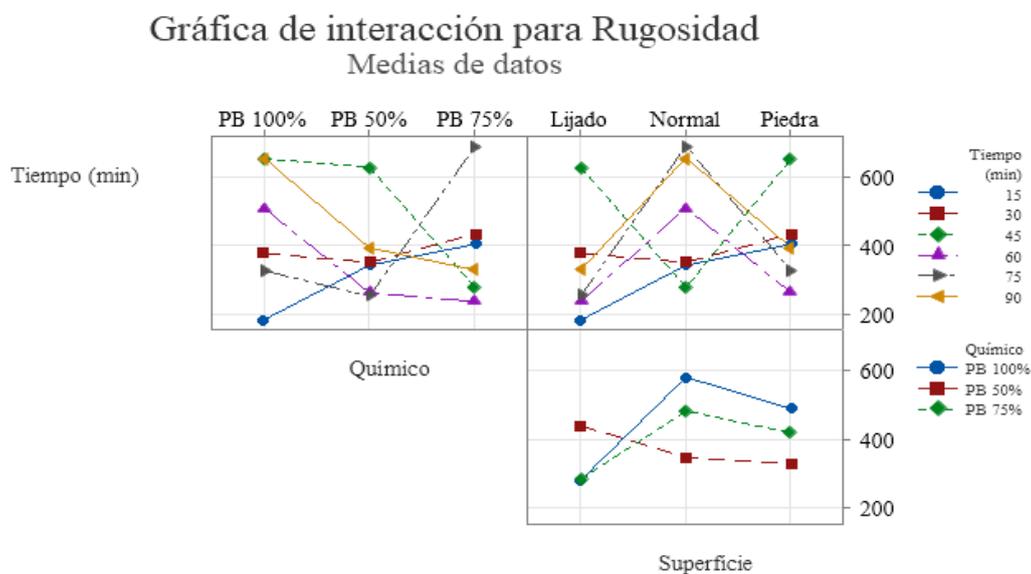
Gráfica de caja de la rugosidad en el pavonado químico en relación a la concentración del agente químico



En la figura 65 se observa las interacciones entre los factores, de igual manera en la tabla 18 se encuentran los resultados máximos y mínimos del pavonado químico.

Figura 65:

Interacción de factores del pavonado químico con resultados de rugosidad

**Tabla 18:**

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

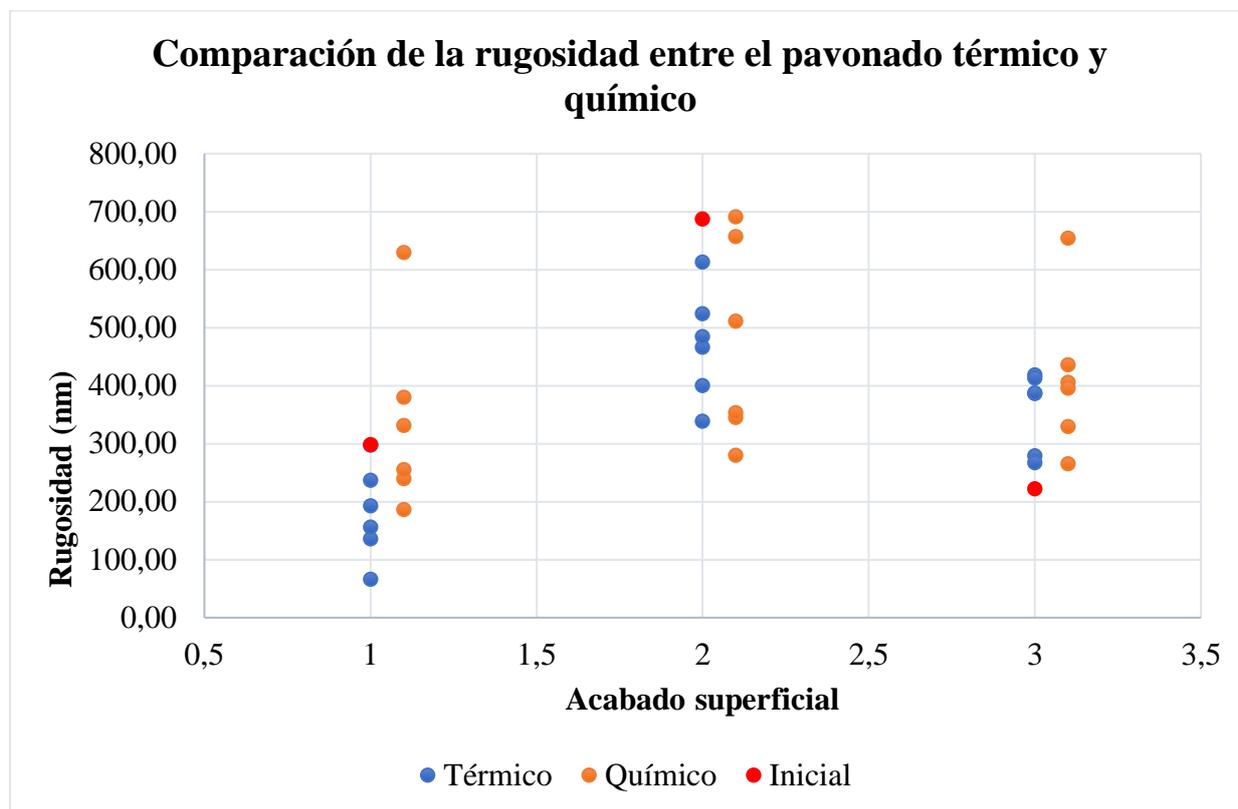
	Tiempo (min)	Químico	Superficie	Rugosidad	% Variación
Max	75	PB 75%	Normal	690,56	0,480
Min	15	PB 100%	Lijado	185,58	-62,430
Cercano al V.I.	75	PB 75%	Normal	690,56	0,480

Comparación de rugosidad obtenido en ambos procesos

Con la figura 66 podemos observar un comportamiento más general de la rugosidad en los dos tipos de pavonado. En el caso del pavonado térmico se observó una reducción de rugosidad cuando se trabajó con el acabado lijado y normal, en cambio se presentó un aumento en el acabado de piedra de rectificar. Dando a entender que para los primeros dos acabados el calor y la capa de óxido formada con aceite da a la superficie una disminución de valles y crestas con respecto a su rugosidad original.

Figura 66:

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

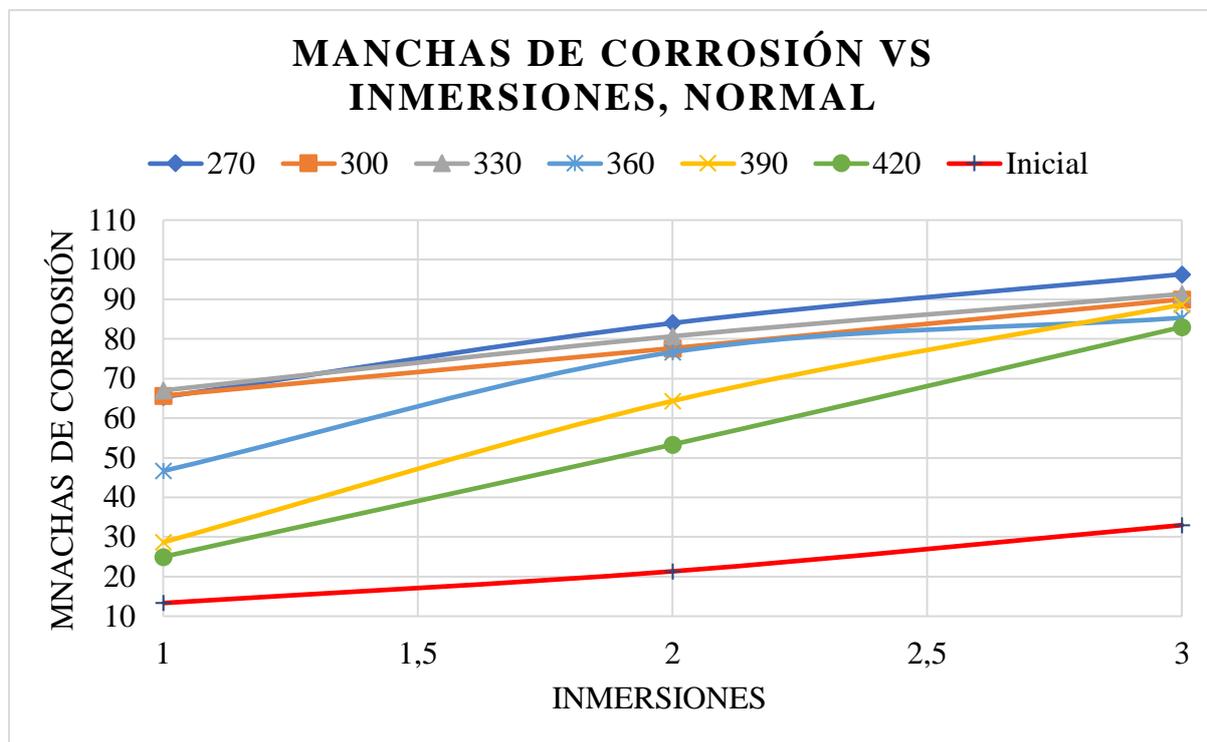
Mientras que para el pavonado químico se obtuvo un aumento de rugosidad en los acabados lijado y de piedra de rectificar, y para el acabado normal se tuvo una disminución de la rugosidad hasta un estado similar (puntual) que los otros dos acabados.

Resistencia a la Corrosión

Para el ensayo de resistencia a la corrosión se aplicó la norma INEN 1176 de inmersión alternada, y se realizó 3 inmersiones por probeta para determinar el avance de la corrosión y el porcentaje de resistencia que ofrece cada proceso de pavonado. Los datos recolectados se encuentran en el anexo 3, mientras que para un mejor entendimiento del ensayo en la figura 67 se puede un ejemplo de la cantidad de manchas de corrosión que aparecieron en las probetas después de cada sumersión.

Figura 67:

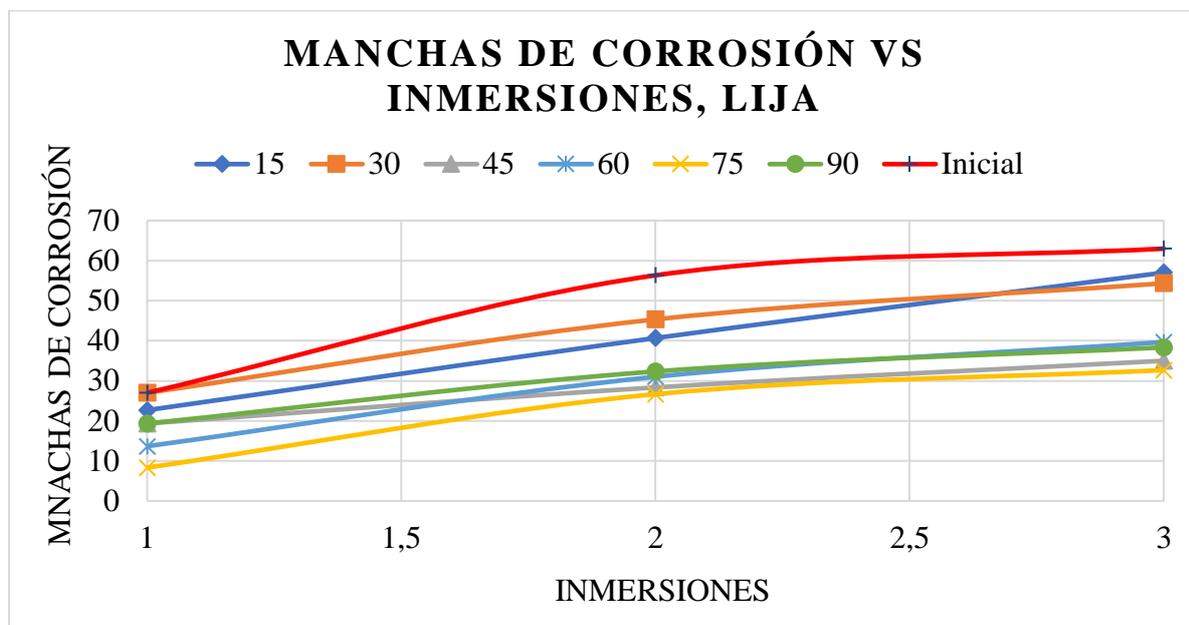
Manchas de corrosión presentes en las probetas de pavonado térmico con acabado superficial normal



La figura 67 muestra el estado más crítico que se encontró en las pruebas de resistencia a la corrosión, por otra parte, la mejor combinación de pavonado se presentó en el pavonado químico con acabado superficial de lija como se ve en la figura 68.

Figura 68:

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



Resistencia a la corrosión del pavonado térmico

Después de realizar el ensayo de resistencia 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, dejándolas igual que antes de aplicar el pavonado. En la figura 69 se observa que las probetas con temperaturas de trabajo mayores a 390°C conservaron su color oscuro.

Figura 69:

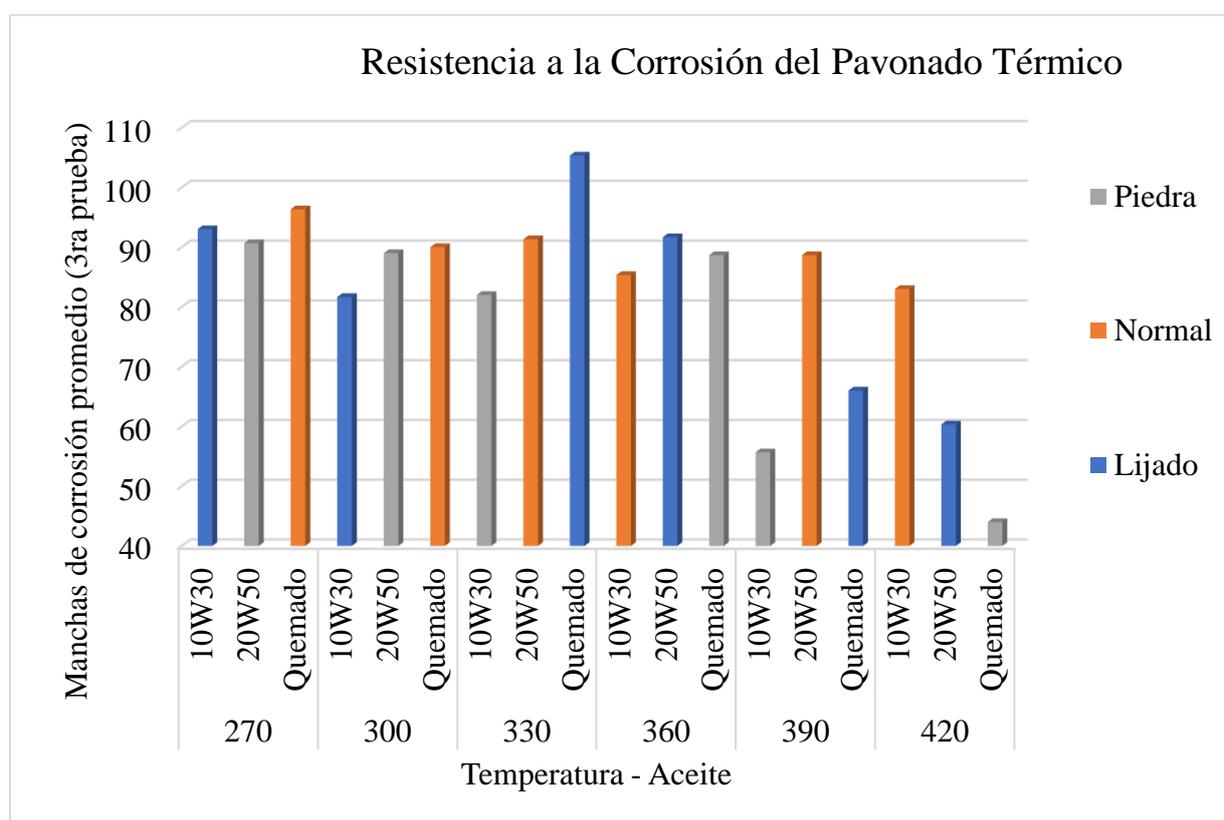
Probetas oxidadas después del ensayo de inmersión alternada



Al finalizar el ensayo de resistencia se obtuvo el promedio de manchas en cada sumersión para cada probeta, con ellos se pudo obtener la corrosión final a la que llegaron las probetas y el crecimiento de la misma. En la figura 68 se observa la cantidad de manchas de corrosión promedio de las probetas de pavonado térmico. En la figura 70 se observa de antemano que la superficie que más resiste a la corrosión es el acabado de piedra de rectificar sumergido en aceite quemado cuando la probeta se calentó a 420°C.

Figura 70:

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



En la tabla 19 se encuentran los datos de corrosión inicial, es decir sin pavonar, para cada tipo de superficie. Para el acabado superficial normal se tiene una menor cantidad de manchas de corrosión en cada sumersión lo que le da un grado 4-3 de resistencia a la corrosión, al contrario del acabado tipo lija que posee un grado 3-2.

Tabla 19:

Valores del promedio de manchas de corrosión en las probetas sin aplicar ningún pavonado

Corrosión inicial	Promedios			G-RC		
	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

Los valores obtenidos de manchas en la superficie de las probetas de pavonado térmico se muestran en la tabla 20, así como su grado de resistencia, y como se observa en la columna de G-RC la mayoría de las probetas tienen un nivel 2 de resistencia a la corrosión, exceptuando las probetas que posean temperaturas de trabajo superiores a 390°C.

Tabla 20:

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

Nota: Se destaca la combinación A9 debido a que presenta el menor valor registrado para el grado de resistencia a la corrosión

La tasa de crecimiento es la comparación de las pendientes de las curvas que se observan en las figuras 67 y 68. Se obtiene la pendiente mediante la ecuación de dos puntos y se compara de manera porcentual, con la finalidad de saber si el pavonado tiene un comportamiento creciente o decreciente en la propagación de la corrosión, dichos valores se muestran en la tabla 21 y para una mejor visualización en la figura 71.

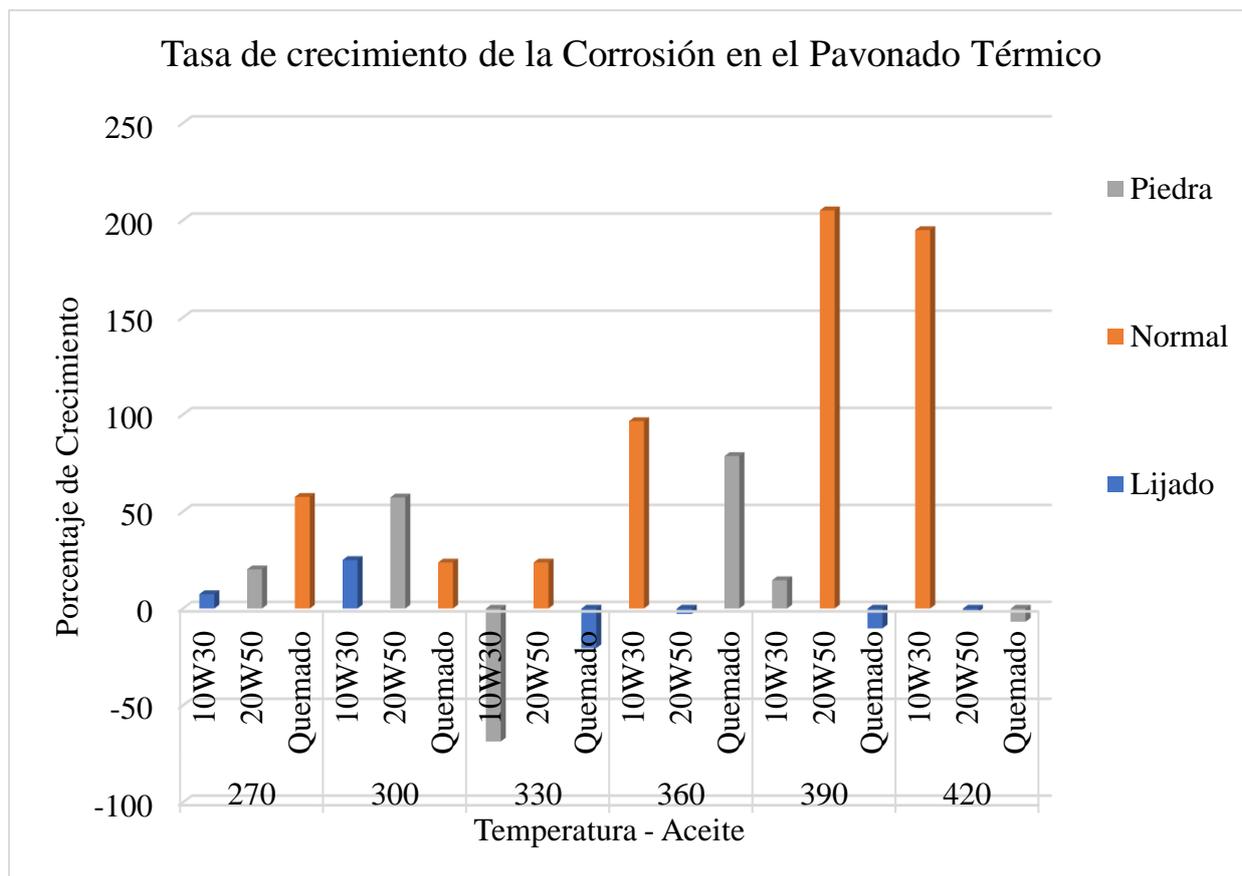
Tabla 21:

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	

Figura 71:

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

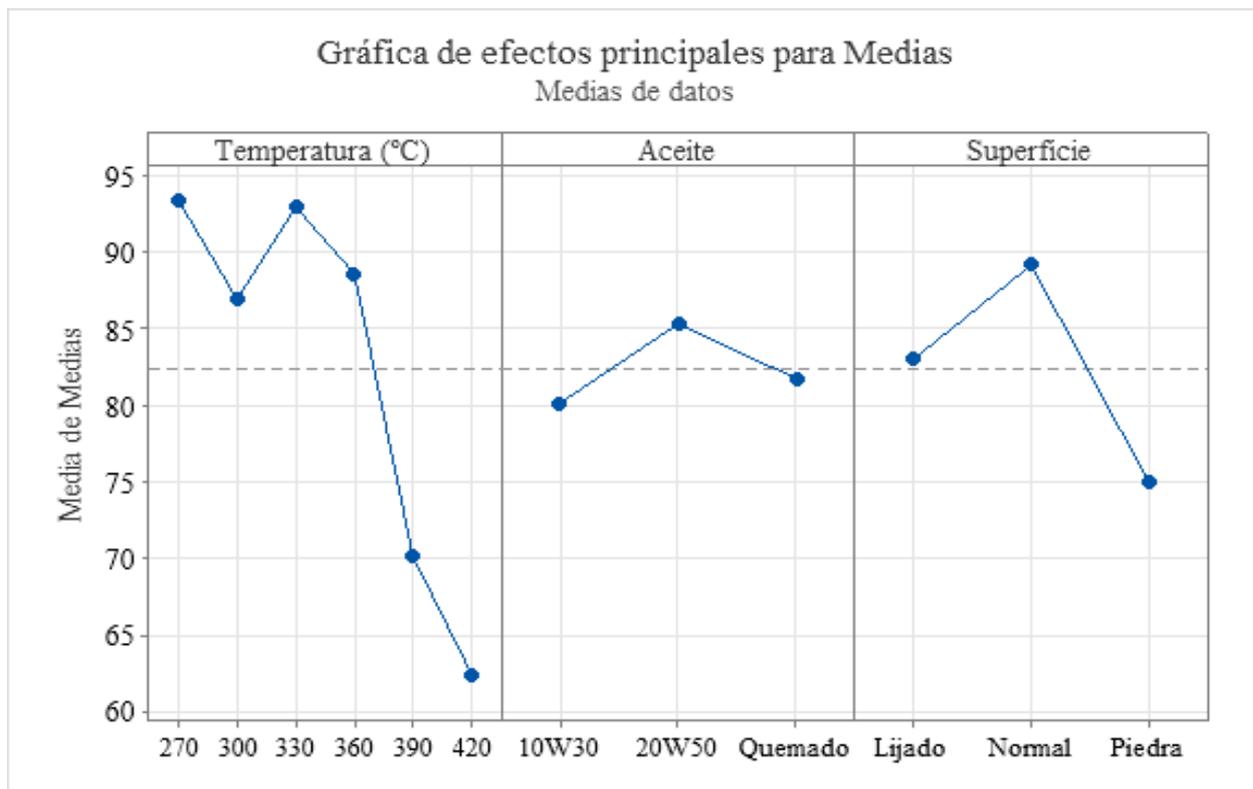


Como se esperaba, la ventaja que tenía el acabado superficial normal se perdió después de ser aplicado el pavonado, en la figura 71 se muestra que este acabado es el que más propaga la corrosión en el acero, aun cuando se trabaja con temperaturas altas. Por otra parte, el acabado que mejor resiste a la propagación de la corrosión es el acabado superficial lijado.

Después de obtener todos estos resultados iniciales, se procedió a realizar un análisis ANOVA para determinar la interacción de sus factores y determinar cuál factor es el más crítico. En la figura 72 se muestran los efectos principales de cada factor, en cual se observa que el factor determinante en el pavonado térmico es la temperatura, y se destacan dos eventos: la temperatura de 270°C con 330°C y 420°C.

Figura 72:

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



Como se mencionó anteriormente las mejores condiciones para que el acero resista a la corrosión es en temperaturas superiores a 390°C y como se ve en la figura 72 existe una caída notable en el número de manchas presentes en las probetas bajo estas condiciones, para este caso obviamente mientras menos manchas es mejor. Por otra parte, el punto más crítico se da a la temperatura de 270°C ya que al igual que como se ve en la tabla 22, se presenta la mayor cantidad de manchas de corrosión en las probetas.

En la agrupación de niveles de temperatura presentada en la tabla 22, se observa que existen tres grandes diferencias entre las temperaturas. Y su diferencia es más notable en la figura 73 que nos muestra la agrupación de datos y sus rangos, mientras que para las primeras 5 temperaturas se tiene datos que superan las 80 manchas de corrosión, solo la temperatura de 420°C llega a un valor menor de 50 manchas.

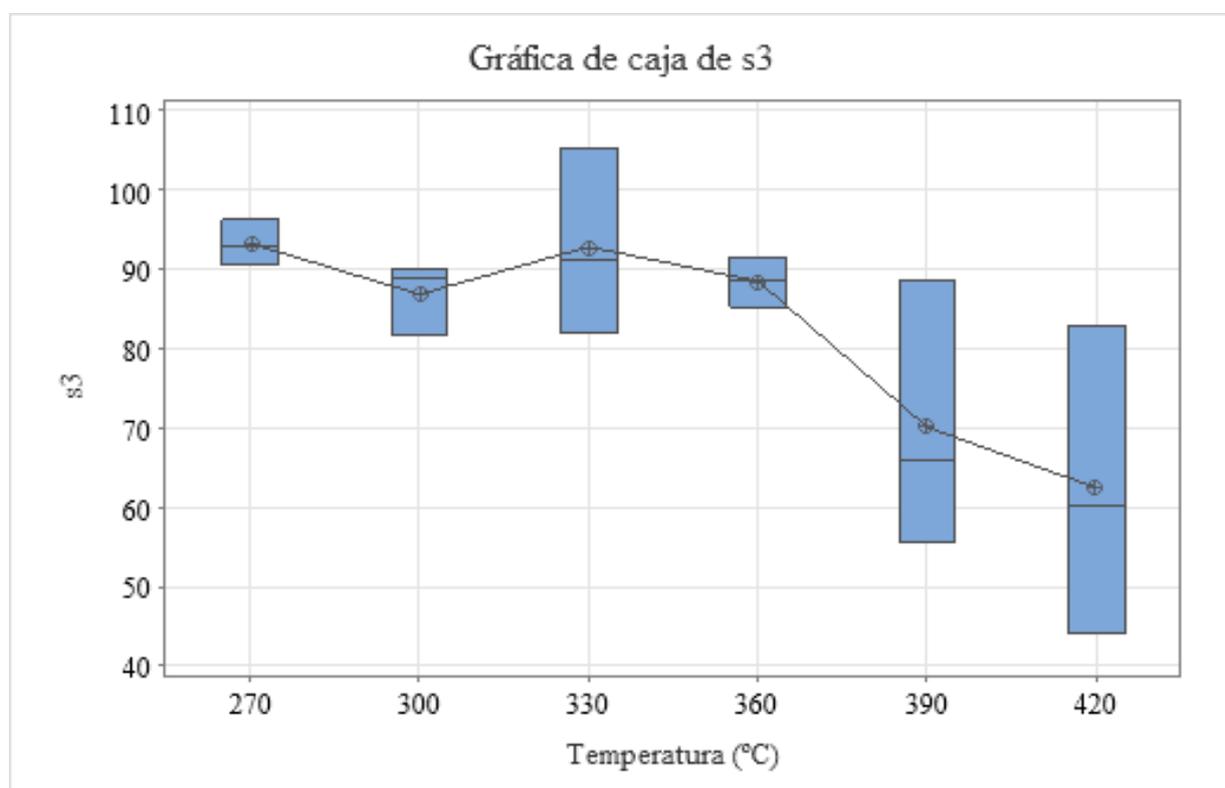
Tabla 22:

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 73:

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

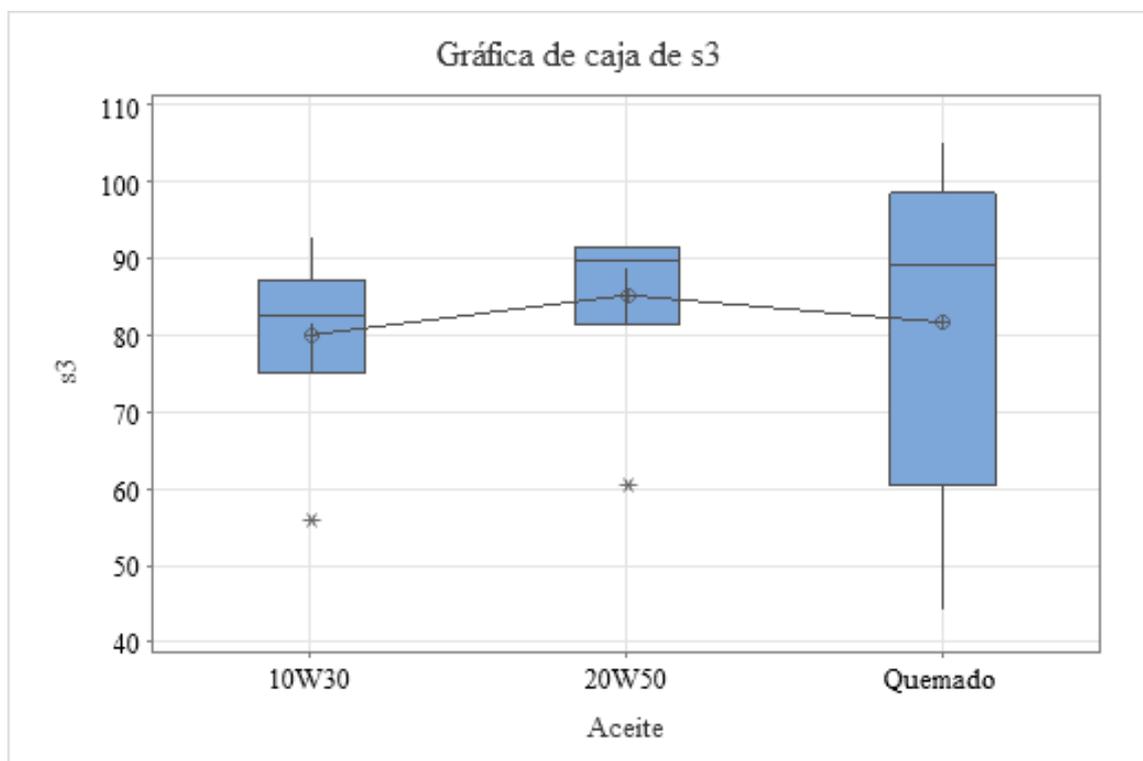


En el análisis de la interacción del aceite se encontró una diferencia notable en el aceite quemado, mientras que en la figura 74 se observa que el factor que más se acerca a la media, su comportamiento es demasiado errático. Como se ve en la figura 74 los datos para este factor se encuentran bastante dispersos alcanzando un rango bastante grande, a

diferencia de los otros dos aceites que, aunque se encuentran en valores altos, su rango es menor y tienden a ser más predecibles.

Figura 74:

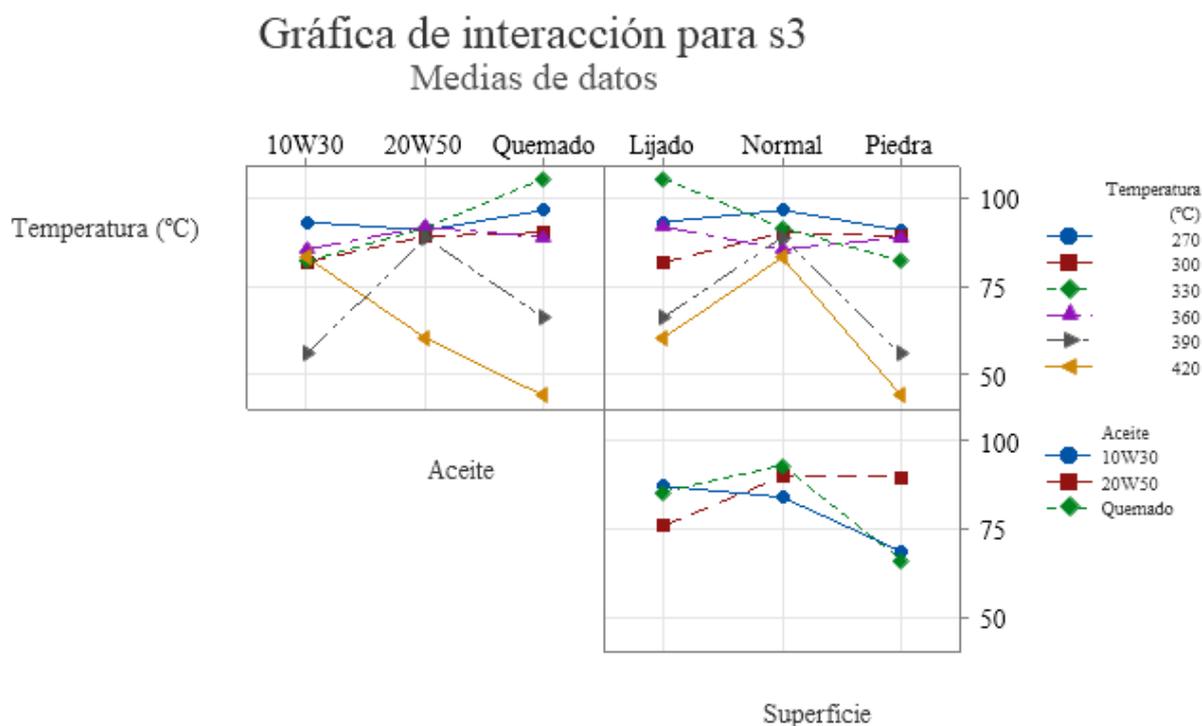
Representación de caja para las manchas de corrosión en el pavonado térmico en relación con el aceite



En la interacción de los tres factores se obtuvo los datos máximos y mínimos del ensayo, es decir el mejor y el peor. En la figura 75 se observa dicha interacción y en la tabla 23 se muestran los valores y combinaciones de los datos máximos y mínimos.

Figura 75:

Interacción de factores del pavonado térmico con resultados de resistencia a la corrosión para la última sumersión

**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

Resistencia a la corrosión del pavonado químico

En las probetas de pavonado químico no se registró pérdida de color o una corrosión agresiva después de que se hiciera el ensayo de inmersión alterna. Como se muestra en la figura 76, la resistencia a la corrosión aumentó gracias a este tipo de pavonado, de igual manera el grado de corrosión para estas probetas se observa en la tabla 24, y a diferencia de la tabla 20 el grado predominante es de 3.

Tabla 24:

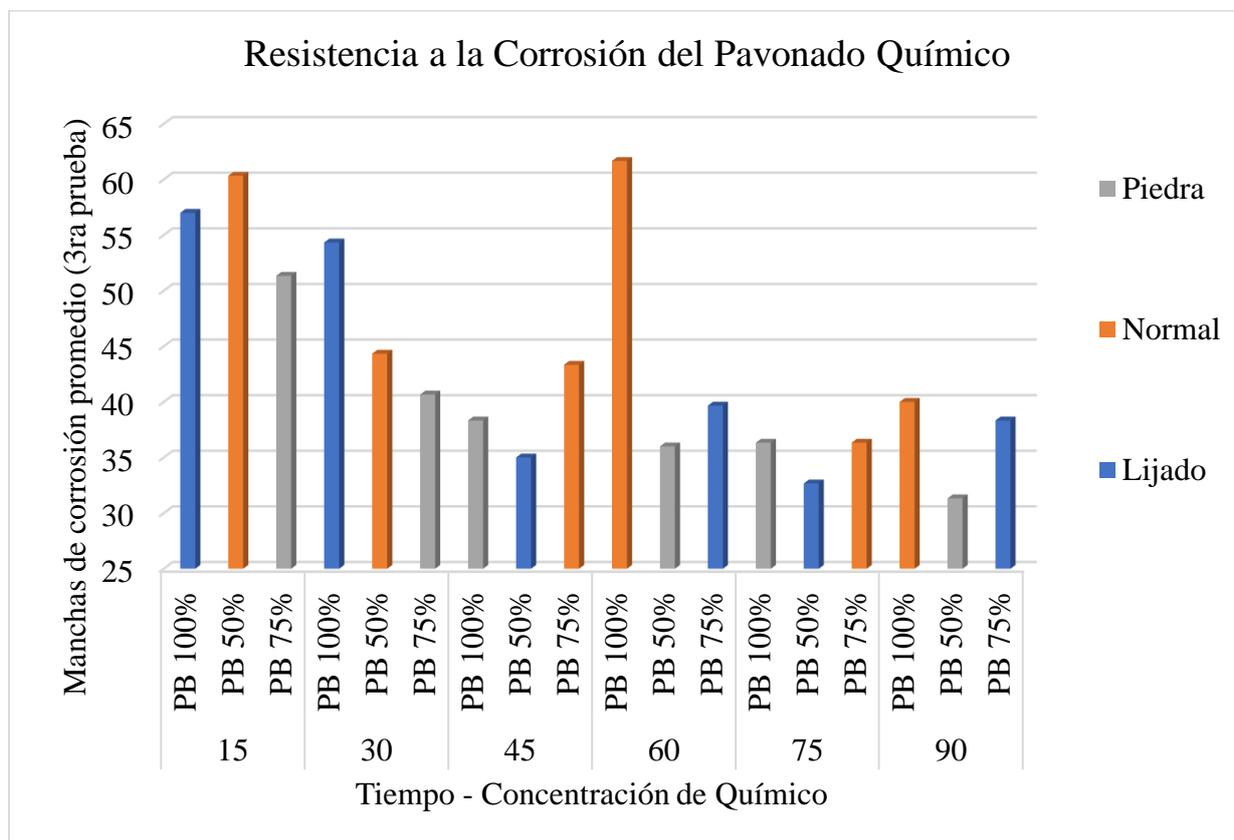
Valores del promedio de manchas de corrosión en las probetas de pavonado químico

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

En la figura 73 se observa una gran diferencia de la resistencia a la corrosión en relación al pavonado térmico, siendo lo más destacado que el máximo de corrosión obtenido fue de 62 manchas (promedio) en la combinación de 60 minutos de sumersión, concentración al 100% y acabado superficial normal.

Figura 76:

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



De igual forma que para el pavonado térmico, se realizó un análisis del crecimiento y propagación de la corrosión en las probetas por lo que se obtuvo los valores de la tabla 25, donde se observa que ningún dato supera el 60% de crecimiento y el mejor resultado obtenido es que de -56.48%, es decir redujo el crecimiento de la corrosión. Todos estos resultados se pueden observar en la figura 77.

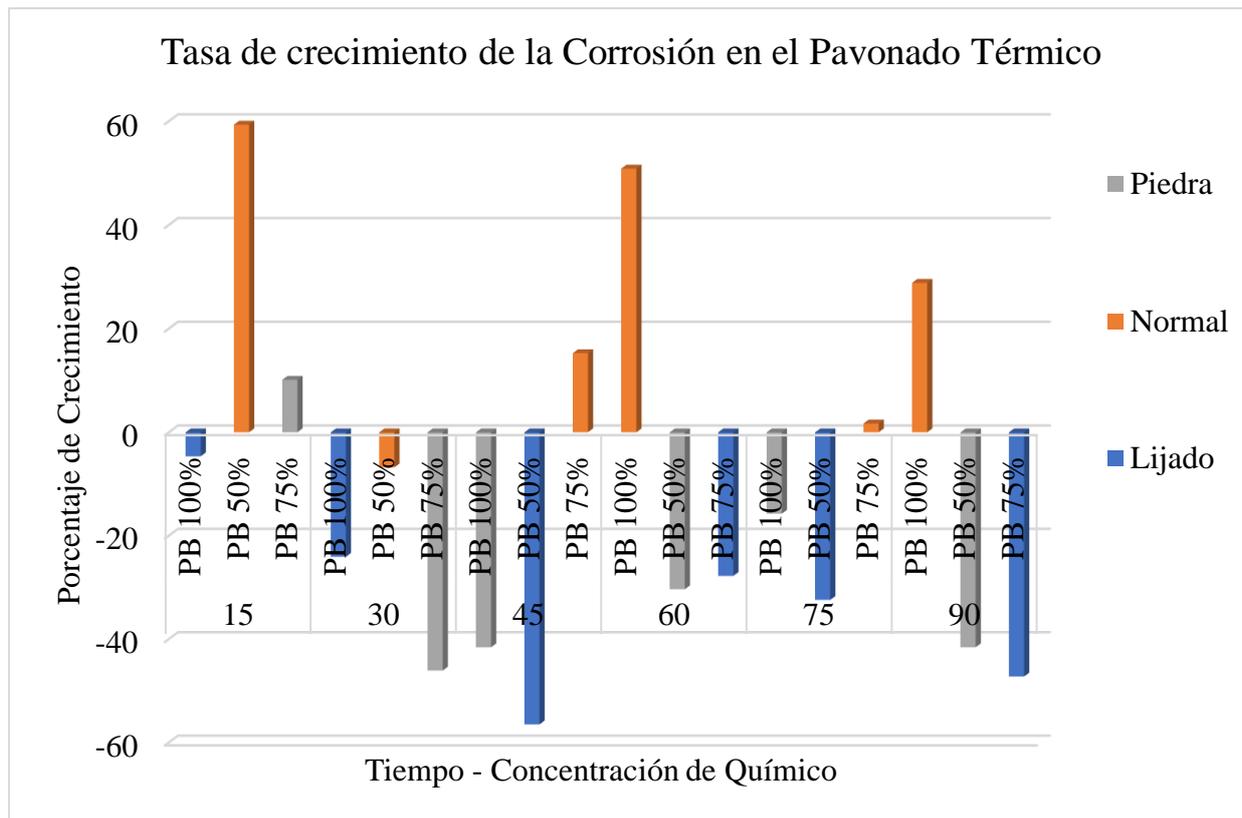
Tabla 25:

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

Código	Promedios				% Variación
	n3	n2	n1	m	
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	

Figura 77:

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

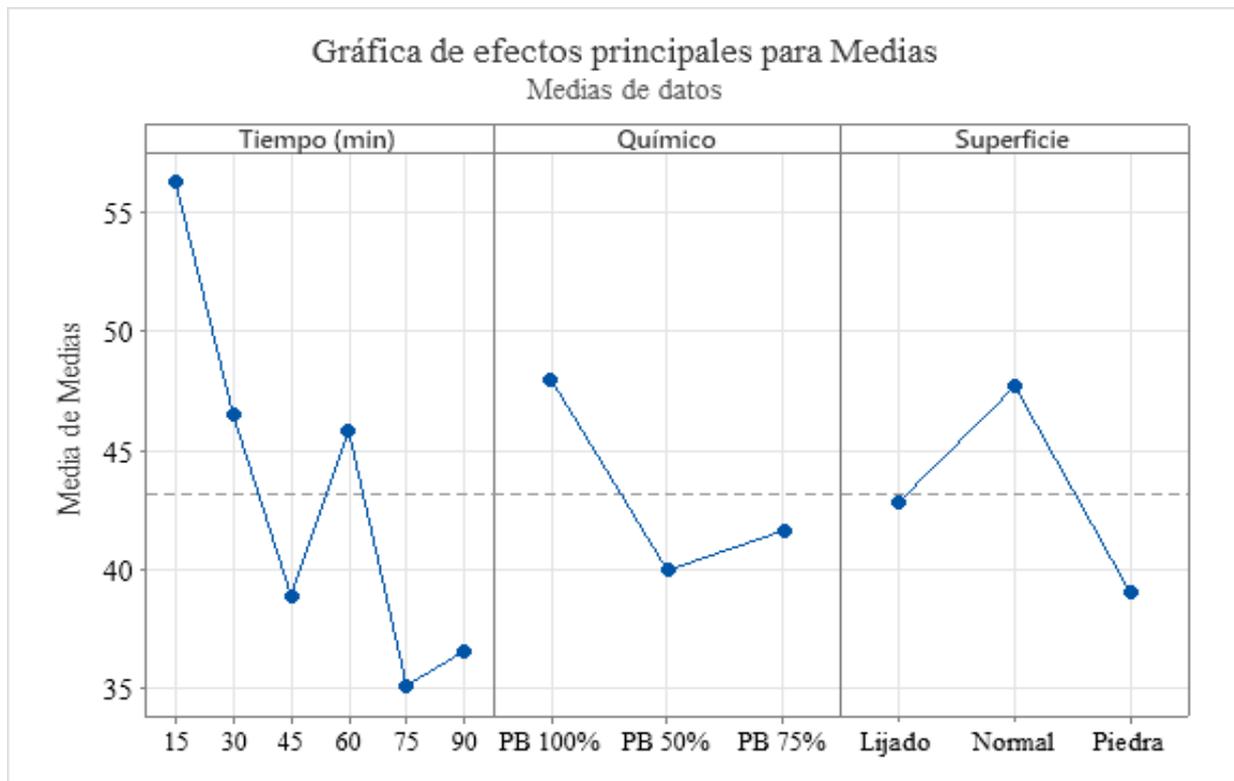


El comportamiento más destacado en la figura 77 es el del acabado superficial normal, ya que a excepción de 1 punto todos aumentan el crecimiento de la corrosión en las probetas.

Después de obtener los resultados iniciales de resistencia a la corrosión se hizo un análisis ANOVA para observar el comportamiento de los factores principales y su interacción. Para este caso tenemos como eventos críticos el tiempo de sumersión de 15 y 75 minutos ya que son los que mayor y menor corrosión presenten respectivamente, como se ve en la figura 78 se tiene una tendencia a disminuir la corrosión mientras se aumenta el tiempo de sumersión.

Figura 78:

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



Para el tiempo de sumersión tenemos dos grupos, de los cuales prácticamente el factor de 15 minutos de sumersión es el único excluido, como se ve en la tabla 26 la media de datos para este factor es mucho más grande en comparación que los demás, siendo por ende el menos efectivo en cuanto a resistencia a la corrosión.

Tabla 26:

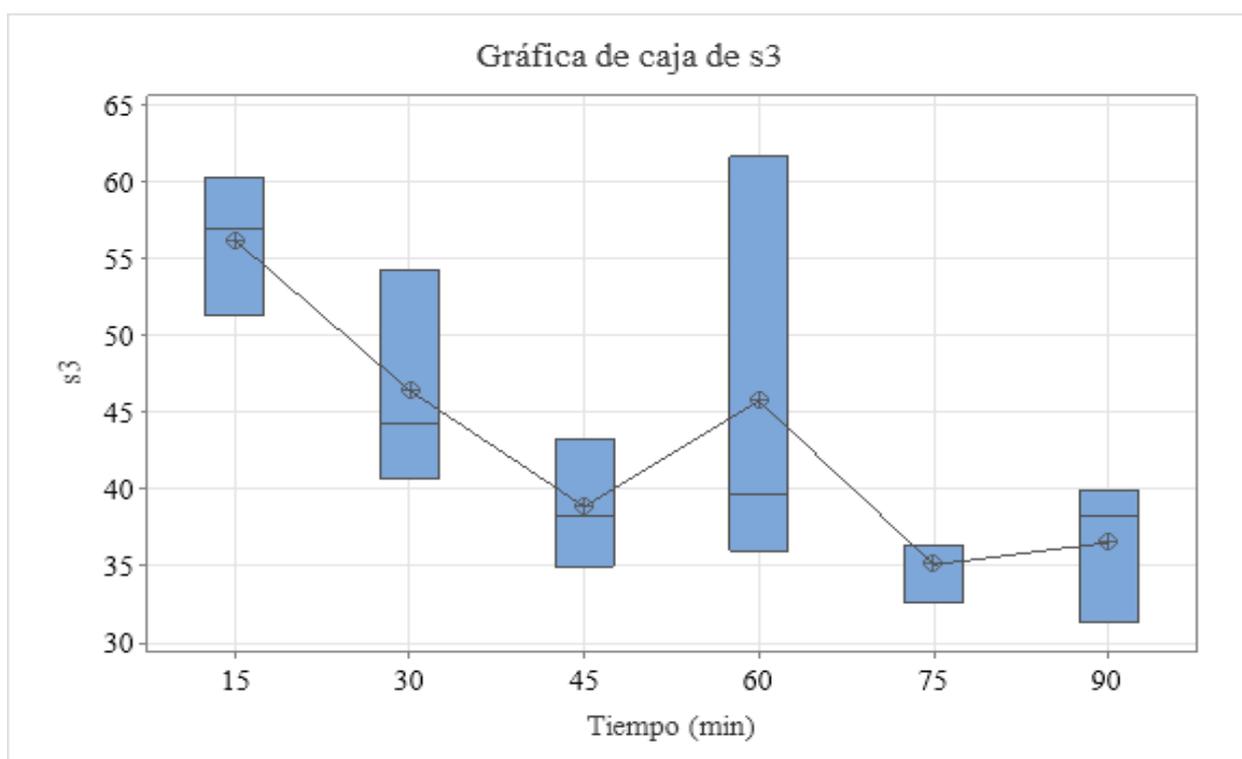
Agrupación del factor tiempo según el método de LSD de Fisher con un nivel de confianza del 95%, con respuesta en manchas de corrosión

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

Para el tiempo de sumersión de 60 minutos ocurre un comportamiento diferente al resto, como se ve en la figura 79 para este tiempo de sumersión se tiene un rango amplio de datos, lo que se interpreta como un comportamiento aleatorio, los valores de medias de manchas de corrosión van desde aproximadamente los 35 hasta las 62.

Figura 79:

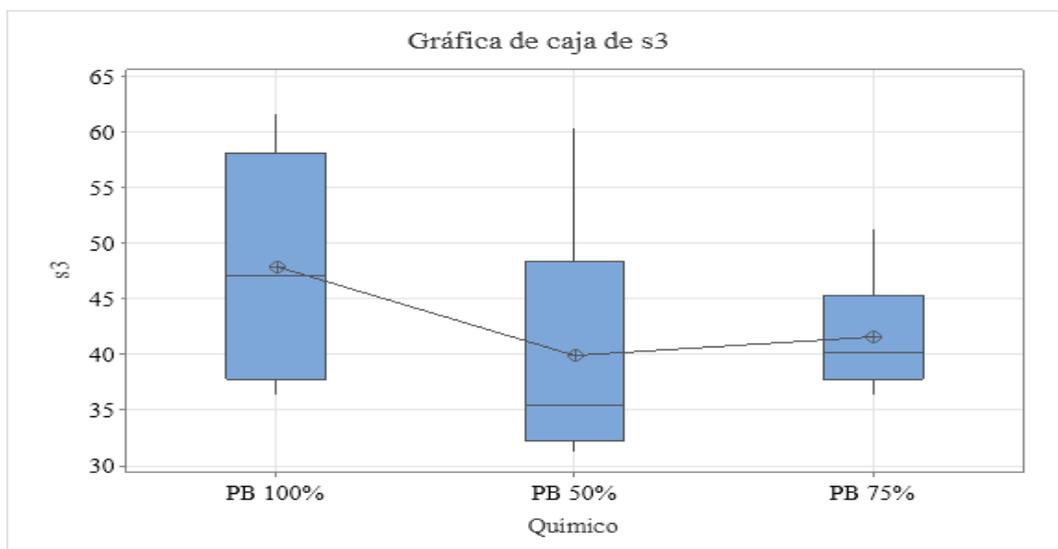
Representación de caja para las manchas de corrosión en el pavonado químico en relación con la temperatura



En cambio, para la concentración del químico PavonBlack ocurre lo inverso a lo esperado, empíricamente se piensa que con la mayor concentración de químico se obtuviera la mejor resistencia a la corrosión. Pero en cambio sucedió de forma contraria, la menor concentración de químico fue la que llegó a los valores más bajos de manchas de corrosión, en la figura 80 se puede observar una tendencia a disminuir las manchas de corrosión mientras disminuye la concentración del químico.

Figura 80:

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



Este efecto se debe en mayor parte a que el químico utilizado es demasiado agresivo para el acero, como se ve en la figura 81, una probeta extra fue puesta a reaccionar con el químico pavonador, pero a esta no se le aplicó una post limpieza, quedando con el químico aun reaccionando con la superficie, el resultado se puede notar claramente y se observa una completa oxidación en toda la probeta.

Figura 81:

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



Nota: La concentración utilizada del agente químico fue del 100%

Por último, la figura 82 de interacciones de factores nos muestra los valores de combinaciones más críticas y los mejores del pavonado químico, cuyos datos son mostrados en la tabla 27.

Figura 82:

Interacción de factores del pavonado químico con resultados de resistencia a la corrosión para la última sumersión

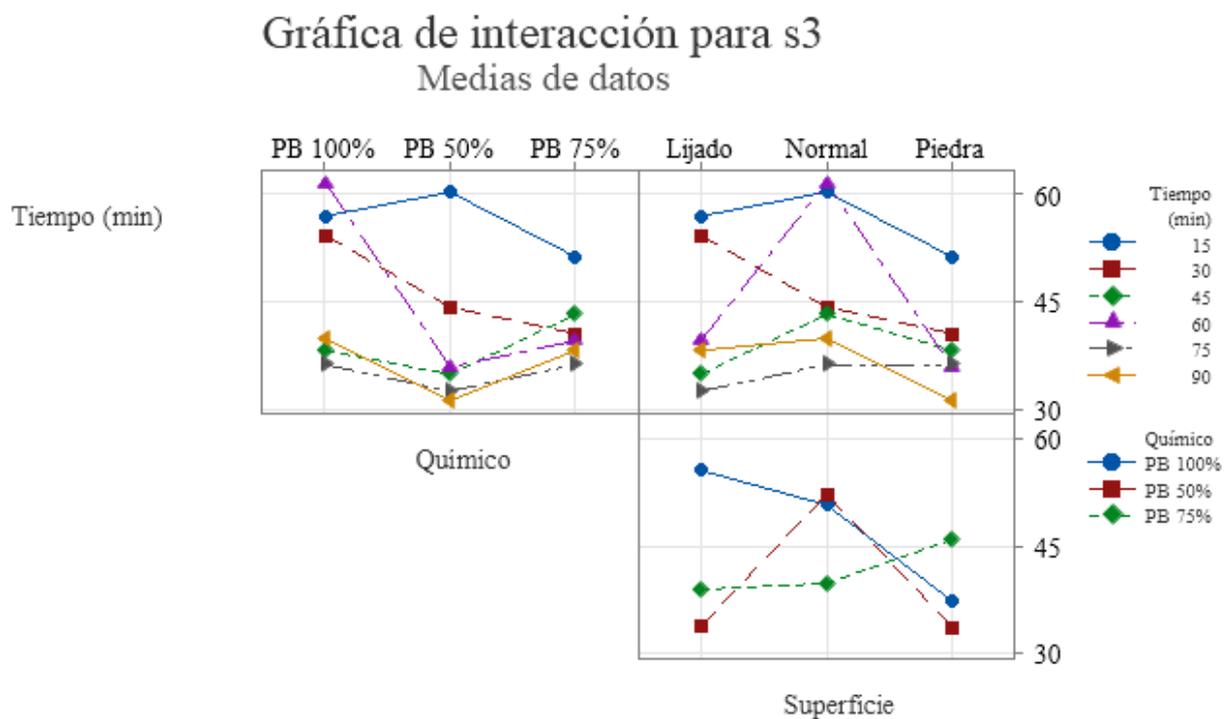


Tabla 27:

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

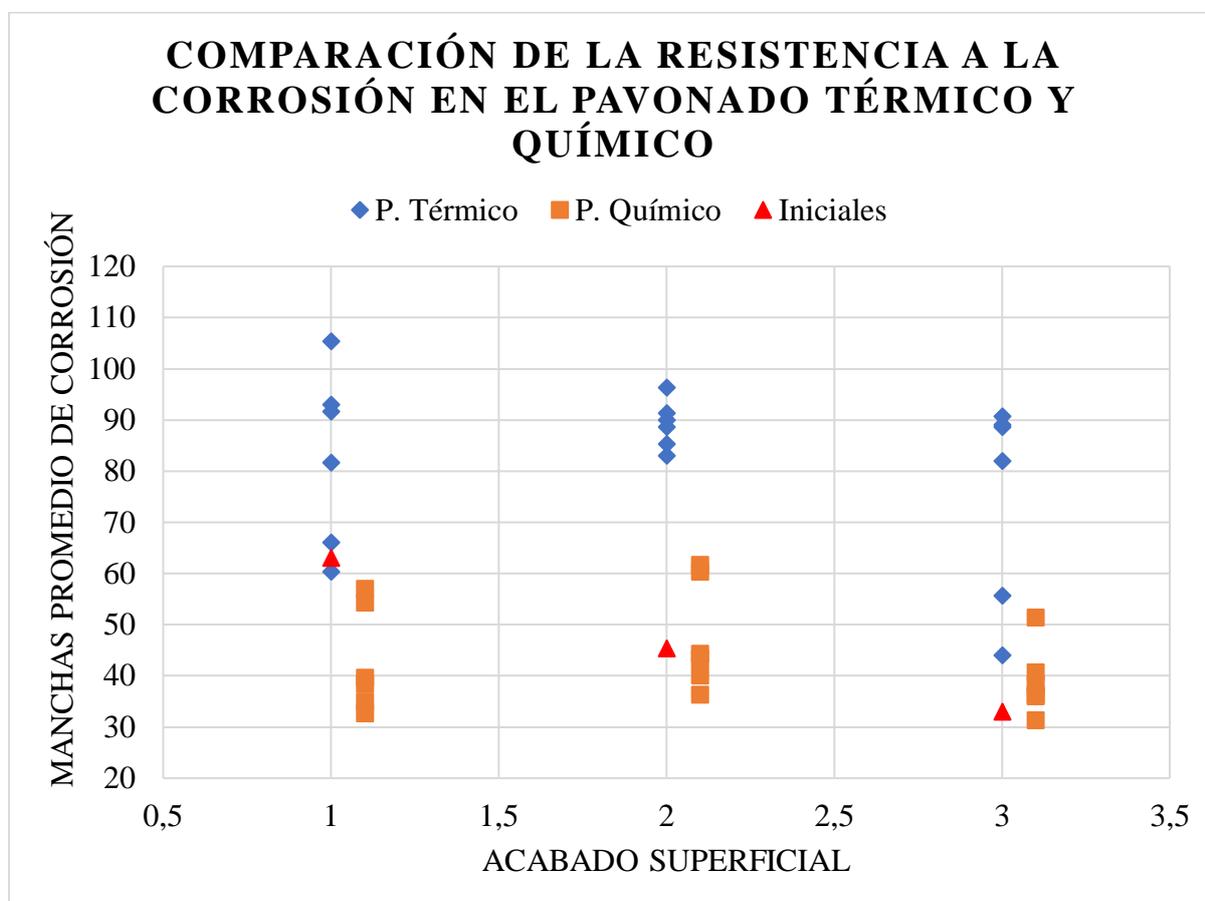
Nota: La variación se la obtuvo de la relación entre promedios de la tercera sumersión del ensayo

Comparación de la resistencia a la corrosión obtenidas en ambos procesos

Se usó el factor superficie para comparar los resultados de la resistencia a la corrosión en los dos tipos de pavonado. En este caso existe una diferencia notable, 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, siendo la más notable la combinación de la tabla 27. En la figura 83 se visualiza de mejor manera la comparación entre estos dos procesos.

Figura 83:

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



Nota 1: 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

Determinación del mejor proceso de pavonado

Cada combinación de factores en los dos procesos de pavonado dio un resultado diferente, descartando una falsa homogeneidad de datos con el análisis ANOVA. La relación entre variables ayuda a comprender de mejor manera como contribuye cada factor en el resultado de los objetivos que se quieren lograr. Para el presente trabajo se busca el mejor proceso de pavonado que posea el mayor grado de protección ante la corrosión, pero para otros trabajos o diferentes enfoques se puede seleccionar como objetivo el menor cambio de dureza, el color, etc.

En la tabla 28 se muestran las combinaciones de factores de pavonado con resultados destacables en resistencia a la corrosión y sus consecuencias en cuanto a dureza y color, mientras que en la tabla 29 se muestran las combinaciones de factores de pavonado como resultados en cuanto a dureza, y en la tabla 30 los resultados destacables son basados en la rugosidad.

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

Pavonado					Consecuencias			
RC	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*

Pavonado					Consecuencias			
HBR	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
óptimo	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

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

Pavonado					Consecuencias			
Rugosidad	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%

Análisis de costos

El análisis de costos realizado está basado en valores estimados que fueron entregados por el personal de los laboratorios ocupados; como el Laboratorio de Ciencia de Materiales, Procesos de Manufactura, Mecánica de Materiales y de Caracterización de Nanomateriales.

Costos directos

Tabla 31:

Costos directos del proyecto

Ord	ítem	Unidad	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total
1	Placa de acero	U	1	\$ 18,00	\$ 18,00
2	Probetas de acero	U	175	\$ 0,50	\$ 87,50
3	Aceite 10W30	L	2	\$ 6,00	\$ 12,00
4	Aceite 20W50	L	4	\$ 6,00	\$ 24,00
5	Aceite quemado	L	2	\$ -	\$ -
6	Químico PavonBlack	Gal	2	\$ 18,64	\$ 37,28
7	Químico Latón	Gal	1	\$ 14,11	\$ 14,11
8	Franelas	U	4	\$ 2,93	\$ 11,72
9	WD-40	U	1	\$ 4,40	\$ 4,40
10	Lija de agua N100	U	4	\$ 0,15	\$ 0,60
11	Lija de agua N220	U	4	\$ 0,23	\$ 0,92
12	Lija de agua N400	U	4	\$ 0,40	\$ 1,60
13	Lija de agua N1000	U	10	\$ 0,50	\$ 5,00
14	Guantes quirúrgicos	U	5	\$ 0,62	\$ 3,10
15	Mascarillas	U	10	\$ 1,29	\$ 12,90
16	Tiñer	U	1	\$ 4,19	\$ 4,19
17	Rollo de plástico	U	1	\$ 1,97	\$ 1,97
18	Pintura	U	1	\$ 1,69	\$ 1,69
19	Guantes de nitrilo	U	1	\$ 3,35	\$ 3,35
20	Latas 1L	U	3	\$ 1,25	\$ 3,75
21	Tubo de acero 3/4 x 0,9	U	1	\$ 8,50	\$ 8,50
22	Mecanizado probetas	U	5	\$ 5,00	\$ 25,00
23	Alambre galvanizado	U	1	\$ 1,50	\$ 1,50
24	Contenedor rectangular	U	3	\$ 1,00	\$ 3,00
25	Botellón de agua	U	4	\$ 1,13	\$ 4,52
26	Sal Marina	U	2	\$ 1,85	\$ 3,70
27	Cajón multiusos	U	2	\$ 1,78	\$ 3,56
Total					\$ 297,86

Nota: El químico de latón fue comprado, pero no utilizado debido a cambios en la estructura de la investigación

Costos indirectos**Tabla 32:***Costos indirectos del proyecto*

ítem	Unidad	Cantidad (días)	Costo unitario (USD)	Costo total
Transporte	Pasaje	80	\$ 2,60	\$ 208,00
Alimentación	N/A	240	\$ 2,50	\$ 600,00
Internet	N/A	240	\$ 0,92	\$ 220,80
Servicios Básicos	N/A	240	\$ 2,50	\$ 600,00
Total				\$ 1.628,80

Tabla 33:*Honorarios de Docentes y Estudiantes que intervinieron en el proyecto*

Nombre	Cargo	Tiempo (horas)	Costo unitario/hora (USD)	Costo Total
Ing. Xavier Sánchez	Jefe de Laboratorio de Ciencias de Materiales	80	\$ 16,00	\$ 1.280,00
Ing. Alejandra Albán	Laboratorista del Laboratorio de Ciencia de Materiales	80	\$ 10,00	\$ 800,00
Ing. Santiago Castellanos	Jefe de Laboratorio de Procesos de Manufactura	40	\$ 16,00	\$ 640,00
Ing. Nicolás Pinto	Laboratorista del Laboratorio de Procesos de Manufactura	80	\$ 10,00	\$ 800,00
Ing. Navas José	Laboratorio del Laboratorio de Mecánica de Materiales	16	\$ 10,00	\$ 160,00
Ing. Karla Vizuete	Laboratorista del Laboratorio de Caracterización de Nanomateriales	40	\$ 10,00	\$ 400,00
Sr. Ronnie Padilla	Estudiante	640	\$ 3,00	\$ 1.920,00
Total				\$ 6.000,00

Tabla 34:*Costo del uso de equipos de laboratorio para el proyecto*

Laboratorio	Máquina-Equipo	Cantidad (horas)	Costo unitario/horas (USD)	Costo total
Procesos de Manufactura	Torno Paralelo	100	\$ 5,00	\$ 500,00
	Fresadora Universal	25	\$ 8,00	\$ 200,00
	Soldadora	16	\$ 5,00	\$ 80,00
	Rectificadora de Ejes	25	\$ 10,00	\$ 250,00
	Esmeril	1	\$ 1,00	\$ 1,00
	Amoladora	16	\$ 3,00	\$ 48,00
Mecánica de Materiales	Durómetro	16	\$ 2,00	\$ 32,00
Ciencia de Materiales	Horno de Alta Potencia	24	\$ 5,00	\$ 120,00
	Microscopio electrónico	4	\$10,00	\$ 40,00
Caracterización de Nanomateriales	Perfilómetro	40	\$ 10,00	\$ 400,00
Total				\$ 1.671,00

Tabla 35:*Tabla Resumen de Costos*

Tipo de costo	Costo
Directo	\$ 297,86
Indirectos	\$ 1.628,80
Honorarios	\$ 6.000,00
Laboratorios	\$ 1.671,00
Total	\$ 9.597,66

Como observamos en la tabla 35 el costo total para este proyecto fue de \$9 597.66, de los cuales la Universidad de las Fuerzas Armadas cubrió \$9 299.8.

Capítulo 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. No todas las combinaciones realizadas mostraron una disminución de corrosión, en cambio algunas de ellas se comportaron como difusores de corrosión y aumentaron en gran medida la cantidad de corrosión adquirida en el acero.
- Con las variables de control analizadas en el presente trabajo se encontró que 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 en una concentración de agente químico del 50% con un acabado superficial de piedra de rectificar, esta combinación dio un 30.88% menos de cantidad de manchas de corrosión y un 41.57% de resistencia a la propagación de corrosión en comparación con su estado inicial.
- El acabado superficial normal es uno de los factores que más afecta a la propagación de la corrosión, la cantidad de manchas de corrosión en cualquier combinación que involucre este acabado aumenta en comparación con su estado inicial.
- El acabado superficial de piedra de rectificar es poco común en las piezas mecanizadas en la industria y pulir un acero solo para conseguir una mejor resistencia a la corrosión es un desperdicio de recursos. Una opción mejor que consigue resultados similares es la combinación de pavonado químico de 75 minutos de sumersión con una concentración de 50% y un acabado de lijado, que presenta una reducción en manchas de corrosión del 48.15% y una reducción en la propagación de la corrosión del 32.40%, siendo esta la mejor opción en cuanto a trabajos industriales.

- El pavonado térmico presenta una propagación de la corrosión cuando se trabaja con temperaturas inferiores a 390°C. Para obtener buenos resultados de resistencia a la corrosión con el pavonado térmico se necesita trabajar a temperaturas altas, sin embargo, la mejor combinación que fue de acabado de piedra de rectificar y aceite quemado solo registró una reducción de manchas del 2.94% y una reducción en la propagación de la corrosión del 6.742%.
- Los procesos de pavonado reducen en un pequeño porcentaje no inferior al 10% la dureza del acero, a excepción de cuando se trabaja con un acabado normal ya que en este caso la dureza aumenta y se estabiliza de mejor manera.
- El pavonado altera en una enorme proporción a la rugosidad del acero, en esta investigación se encontró que el valor más alto de crecimiento fue con la combinación de pavonado químico con 45 minutos de sumersión en 100% de concentración del agente químico con un acabado superficial de piedra de rectificar, dando un valor de 195.93% de crecimiento en la rugosidad del acero.
- La concentración del agente químico afecta a la rugosidad debido a que con mayor concentración la reacción química es más agresiva y destruye-forma una capa más irregular de óxido en la superficie del acero.
- Los valores obtenidos de rugosidad fueron bastante variados comparados con su valor inicial, a diferencia de los otros dos factores que mostraron comportamientos más concentrados, la rugosidad tenía un comportamiento aleatorio y errático, es decir tenía varios valores en las distintas combinaciones de los dos tipos de pavonado.

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.
- Establecer una práctica de laboratorio con respecto al tema de tratamientos superficiales anticorrosivos ya que no se poseen en el laboratorio.

Bibliografía

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.infinitiasearch.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 Entendiendo los grados de viscosidad SAE para lubricantes del motor: <https://noria.mx/lublearn/entendiendo-los-grados-de-viscosidad-sae-para-lubricantes-de-motor/>

NRA FAMILY. (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.asminternational.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., & Vizueté, 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.