

5.4.3 Resina poliúrea

Las muestras de resina poliúrea presentaron una combinación de los mecanismos de desgaste observados en las resinas expuestas anteriormente. Hay semejanzas con las muestras de poliuretano porque se apreció desde etapas muy tempranas de la prueba la formación de grietas, aunque con una evolución más lenta en general. En la figura 5.4.11 se puede apreciar una secuencia típica de degradación cuyo efecto final puede apreciarse en la figura 5.4.12 para el caso de la resina sin refuerzos y 5.4.13 para la resina con refuerzos. Al final de las pruebas, las evidencias de fatiga y extrema deformación plástica también fueron detectadas, aunque en menor extensión y de manera correspondiente, con resistencia al desgaste asociada también menor.

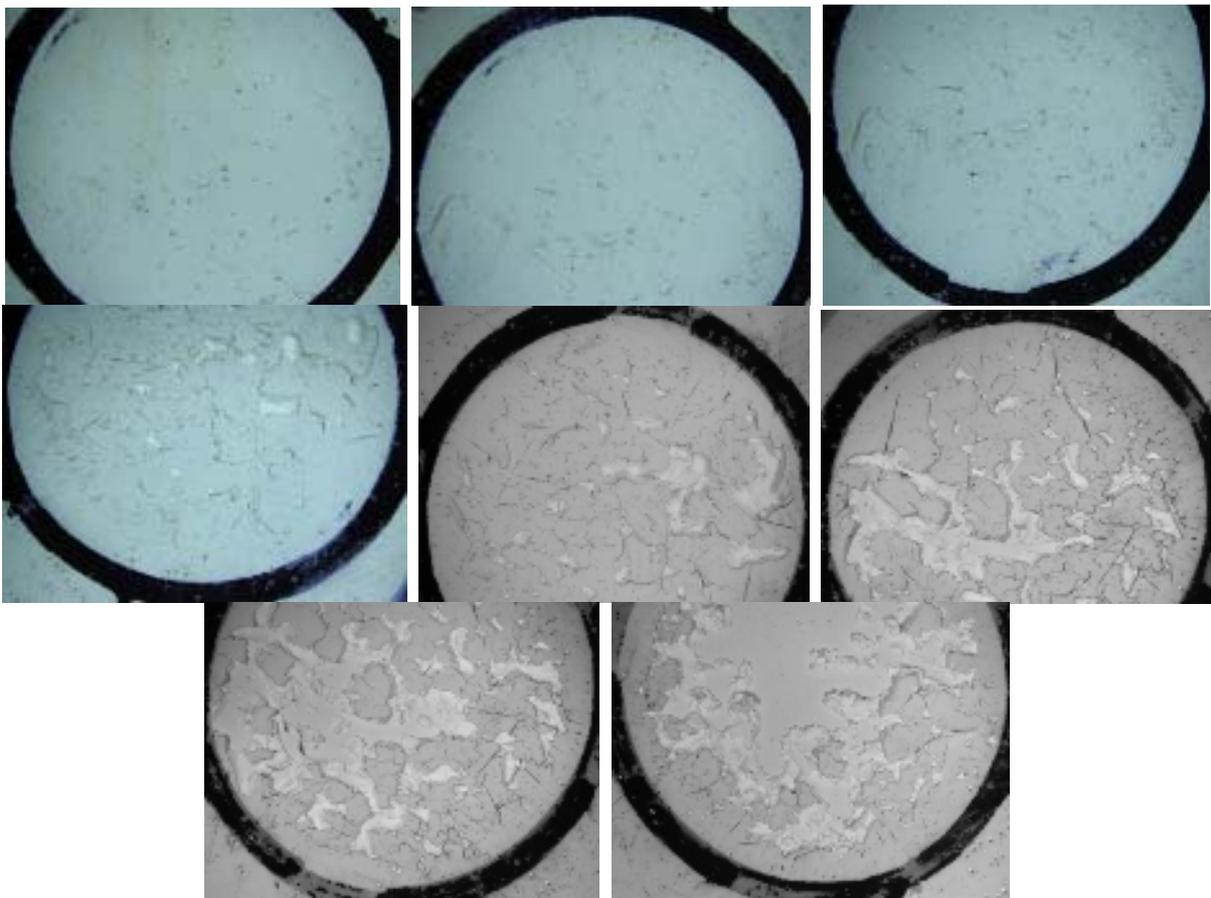


Figura 5.4.11. Secuencia de desgaste en la muestra PUR-1 a los 1, 3, 4, 6, 8, 10, 13 y 19 minutos de prueba.

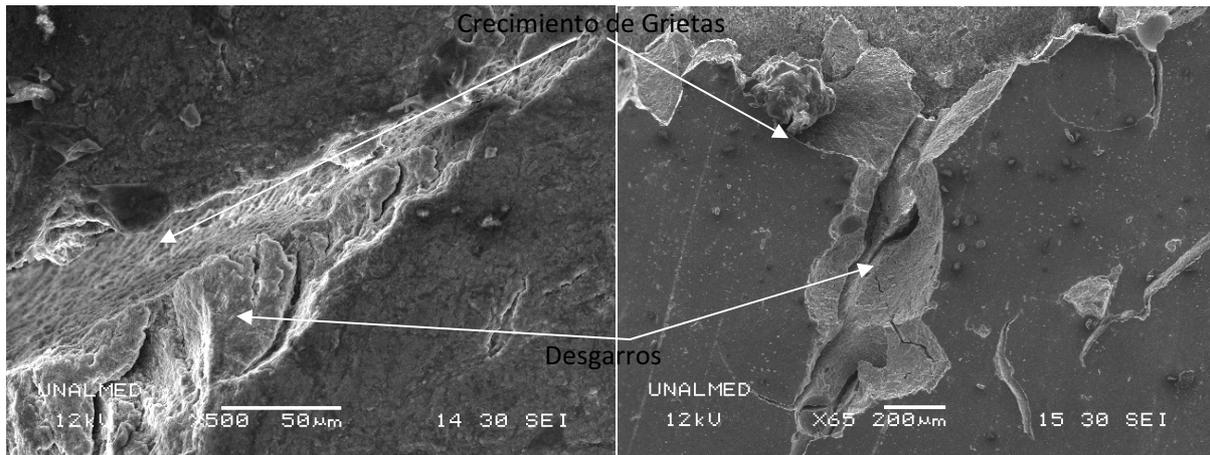


Figura 5.4.12. Estado final de la superficie desgastada de la muestra PUR-CR.

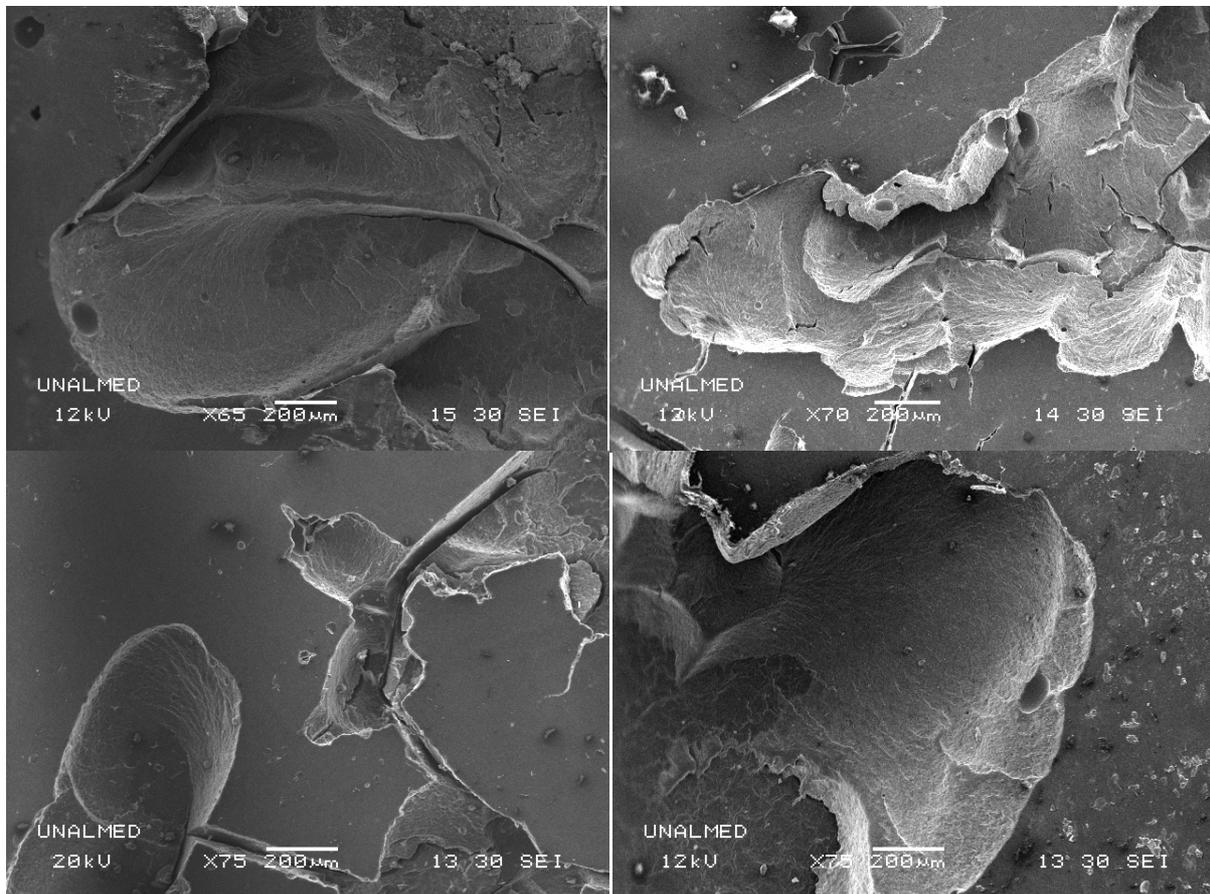


Figura 5.4.13. Estado final de la superficie desgastada de la muestra PUR-SR.

Por otro lado, en la resina epoxifenólica se presentan *crazing* y picaduras, tal y como se observó en las muestras de resina epóxica. Sin embargo, el nivel protector de esta resina fue inferior al de la resina epóxica teniendo en cuenta la que no tiene refuerzos, ya que el comportamiento global de todo el recubrimiento poliúrea fue similar al que tuvieron las muestras epóxicas con refuerzos. Las características de las superficies desgastadas en la

resina epoxifenólica pueden verse en las figuras 5.4.14 para el caso de las muestras sin refuerzos y en la figura 5.4.15 para la muestra con refuerzos.

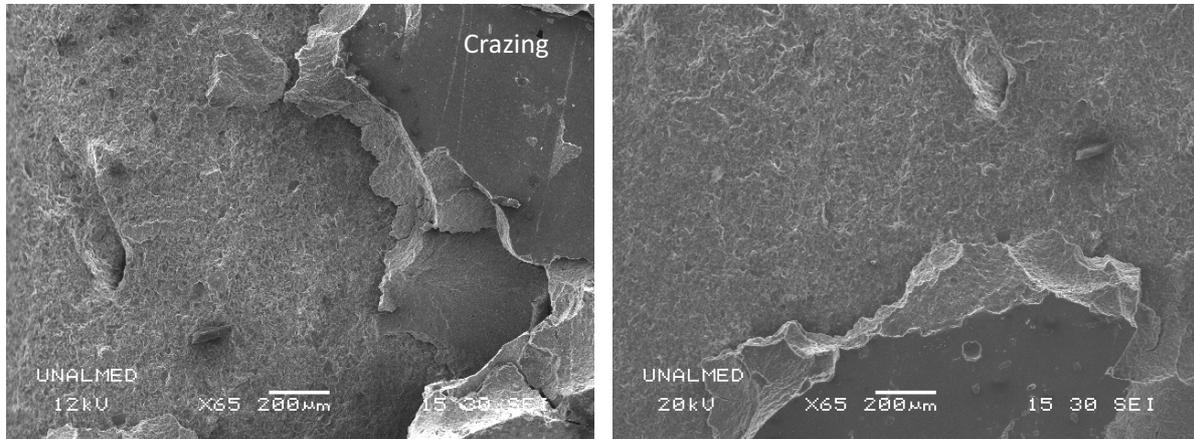


Figura 5.4.14. Estado final de la superficie desgastada de la muestra PUR-CR.

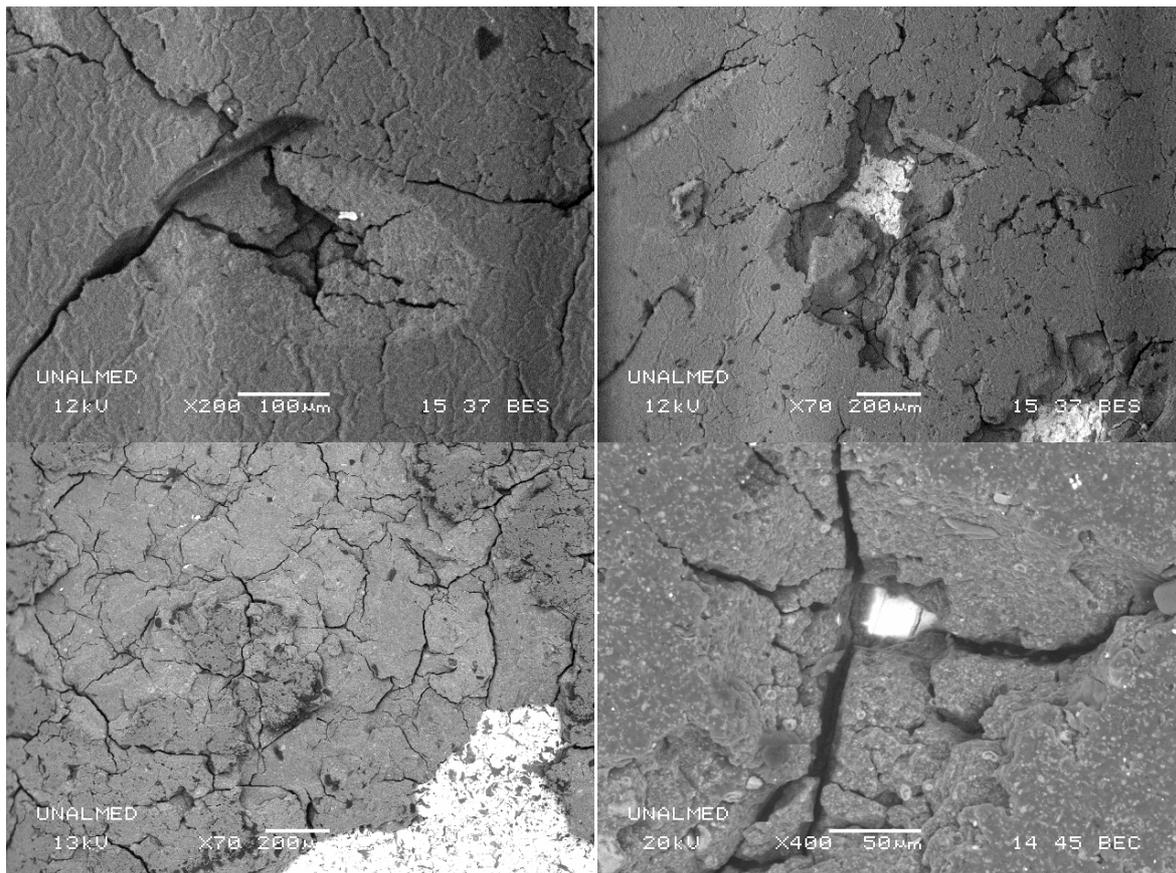


Figura 5.4.15. Estado final de la superficie desgastada de la muestra PUR-SR.

5.5 Correlaciones entre resistencia a cavitación y características estructurales de los recubrimientos

Los resultados presentados en las secciones anteriores mostraron que la porosidad es un factor determinante en la resistencia a la cavitación de los recubrimientos, debido a que los poros poseen superficies "en exceso" en el material, por lo tanto aumentan la energía libre de superficie del recubrimiento y son sitios de nucleación de fallas.

El efecto benéfico de la reducción de porosidad se verificó con claridad en la familia de las resinas epóxicas, pero en las resinas poliuretanas otros factores fueron suficientemente importantes como para impedir mejoras sustanciales (Figura 5.5.1). Los casos de peor resistencia al desgaste en esta familia no se encontraron en las muestras menos porosas, sino en aquellas donde los problemas de adherencia y control de espesor se presentaron con mayor intensidad.

En la figura 5.5.1 puede notarse que la porosidad tuvo un efecto significativo sobre el tiempo de incubación de las resinas epóxicas es decir porosidades pequeñas tienen mayor probabilidad de tener tiempos de incubación grandes, sin embargo el efecto sobre el tiempo de incubación de las poliúreas y poliuretanos fue poco importante. Mostrando las nubes de puntos casi horizontales, o sea que sin importar si las porosidades son altas o bajas, los tiempos de incubación de estas resinas fueron parecidas.

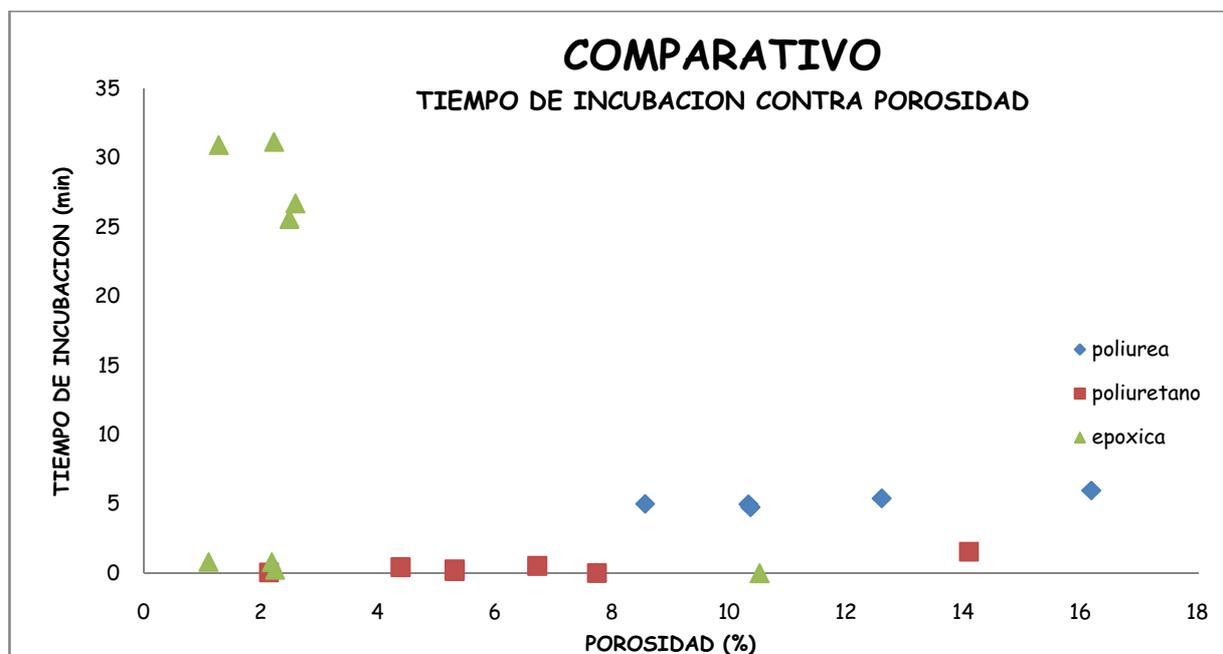


Figura 5.5.1. Gráfico comparativo de porosidad

En el caso de las resinas poliúreas la porosidad fue también determinante porque una vez ocurrió el proceso de nucleación de grietas éstas crecieron aceleradamente dada la respuesta frágil del recubrimiento y su baja adherencia con la resina epoxifenólica que se usó como capa base.

La baja resiliencia que presentaron las matrices poliuretana y poliurea resultó entonces ser más determinante para su resistencia a la cavitación que la misma porosidad, ya que, pese a que en aplicaciones típicas (con tasas de deformación bajas) las propiedades de estos polímeros son similares a las de los cauchos, cuando se encuentran bajo la acción de cargas variables en el tiempo con altas frecuencias su comportamiento se acerca más al de un sólido vítreo, motivo por el cual son más propensas a la fractura frágil. De acuerdo con esto, el efecto nucleador de grietas que tienen los poros es importante, pero lo es más el efecto acelerador de su crecimiento que tienen las tensiones residuales y los problemas de adhesión al sustrato. Este último efecto es aún más significativo cuando se tiene en cuenta que una intercara sustrato-recubrimiento muy discontinua (baja adherencia) causa reflexión de la onda elástica generada durante el ensayo de cavitación, de manera que el recubrimiento se ve sometido a una frecuencia real de aplicación de carga mayor que la nominal.

También debe tenerse en cuenta que, de acuerdo con la grafica 5.2.40 los recubrimientos a base de poliuretano fueron probados en condiciones por encima de su temperatura de transición vítrea, por encima de la cual el material cambia sensiblemente sus propiedades mecánicas, por lo que su baja resistencia al desgaste puede haber sido causada por esta razón.

6 CONCLUSIONES

SOBRE LA MICROESTRUCTURA DE LOS RECUBRIMIENTOS Y LA ADHERENCIA:

- En general los recubrimientos presentaron fallas cohesivas de gran magnitud, en su mayoría atribuibles al proceso de curado.
- La pigmentos y refuerzos presentaron en general baja adherencia con las resinas (en especial estos últimos), lo que se apreció no solamente en el aspecto discontinuo de sus interfases sino en la respuesta pobre frente a la cavitación.
- La porosidad fue una de las características microestructurales de mayor impacto sobre la resistencia a la cavitación, especialmente en los recubrimientos epóxicos, con la ventaja de ser también una de las más susceptibles de ser controladas desde el proceso de aplicación de las pinturas. En los otros recubrimientos su efecto no fue tan notable debido a los mayores problemas de adherencia y cohesión que ellos presentaron.
- El tratamiento superficial que ofreció los mejores resultados en términos de continuidad de la intercara sustrato-recubrimiento fue el proceso de arenado con partículas de óxido de silicio (SiO_2). Sin embargo, las diferencias reales de adherencia en función de la preparación superficial cuando las muestras fueron sometidas a cavitación no fueron tan significativas, como sí lo fueron en función del tipo de resina y los defectos internos.

SOBRE LA RESISTENCIA A CAVITACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS:

- Las resinas epóxicas sin refuerzos presentaron la mejor resistencia al desgaste entre las pinturas estudiadas, representada en los mayores tiempos de incubación y las menores tasas máximas de desgaste.
- El peor comportamiento resistiendo a la cavitación lo presentaron las resinas a base de poliuretanos sin refuerzos, con tiempos de incubación prácticamente nulos y tasas de desgaste máxima muy por encima de las presentadas por los recubrimientos epóxicos.
- Las poliúreas presentaron una resistencia a cavitación intermedia con tiempos de incubación apreciables (sólo superados por los epóxicos sin refuerzos), aunque con

pérdidas de material acumuladas considerablemente altas y mecanismos de desgaste semejantes a los observados en las poliuretanas.

SOBRE LOS MECANISMOS DE DESGASTE:

- Los principales mecanismos de falla que se presentaron en las resinas epóxicas fueron *crazing* y fatiga por acumulación de deformación plástica.
- Los principales mecanismos de falla observados en las resinas a base de poliuretano y poliúrea fueron crecimiento y propagación de grietas y delaminación por baja resistencia adhesivo-cohesiva.
- Todas las discontinuidades en la microestructura de las muestras actuaron como concentradores de esfuerzos con efectos negativos significativos sobre la resistencia al desgaste. Se destacaron particularmente las interfases refuerzo-matriz, los poros y las cavidades o separaciones causadas por problemas de adherencia entre capas de pintura o entre pintura y sustrato.

7 RECOMENDACIONES

- Estudiar en detalle las resinas epóxicas sin ningún tipo de refuerzo o pigmento, pues son las que ofrecen mejor potencial de resistencia a cavitación.
- Avanzar en la formulación de alternativas para mejorar la adherencia entre las resinas y el acero inoxidable. Los métodos de preparación química deben explorarse porque los resultados con preparación mecánica únicamente no son satisfactorios para muchas aplicaciones industriales.
- Realizar pruebas sistemáticas en campo para obtener información que permita mejorar los procesos de formulación y aplicación de las pinturas.
- Estudiar la resistencia al desgaste de recubrimientos mixtos, que combinen 2 o más resinas con propiedades bien diferenciadas.

8 BIBLIOGRAFÍA

Abenojar, J. et. Al. INFLUENCIA DEL POST-CURADO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA RESINA EPOXI REFORZADA CON SiC: ESTUDIO ESTADÍSTICO. Revista Iberoamericana de Polímeros. 2009. pp. 167-179.

Ameron Internacional. Presentación de Coating fundamentals. Provista por PINTUCO S.A

ASTM D1474-98 Standard Test Methods for Indentation Hardness of Organic Coatings. 1998

ASTM G 32. Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus. 2003.

Bagheri, R. Pearson R.A. ROLE OF PARTICLE CAVITATION IN RUBBER-TOUGHENED EPOXIES: 2 INTER-PARTICULAR DISTANCE Polymer 41, pp. 269-276, 2000

Bagheri, R. Pearson R.A. ROLE OF PARTICLE CAVITATION IN RUBBER-TOUGHENED EPOXIES: 1 MICROVOID TOUGHENING Polymer 37, pp. 4529-4538, 1996

Bejarano, W. Teoría básica de recubrimientos. Reporte interno. PINTUCO S.A. 1997

Castellan G.W. FISCOQUIMICA. Addison Wesley Longman 2ª edición. 1987. 1057p.

Chacon, E. RESINAS EPOXICAS Y SILICONAS. Trabajo de area Instituto Universitario de Tecnología de Valencia. 2009, 6p

Chen, C. HIGHLY DISPERSED NANOSILICA-EPOXY RESINS WITH ENHANCED MECHANICAL PROPERTIES Polymer (2008) 3805-3815

Escaler, X.; Eguzquiza, E. et al. Detection of Cavitation in hydraulic turbines. Mechanical Systems and Signal Processing. Agosto de 2004.

Espitia, L.A. RECUBRIMIENTOS POR ASPERSIÓN TÉRMICA PARA APLICACIONES DE EROSIÓN POR CAVITACIÓN EN EL ACERO ASTM A 743 GRADO CA6NM Tesis de maestría Universidad Nacional de Colombia Sede Medellin. 2008. 133p.

FASMEL INGENIERIA Y CONSTRUCCION LTDA.
http://www.fasmel.cl/produccion/poli/re_abra.htm 2003

García, G.L. INFLUENCIA DEL ACABADO SUPERFICIAL SOBRE LA RESISTENCIA DE JUNTAS ADHESIVAS PARA FIJACIÓN DE ELEMENTOS CILÍNDRICOS. Tesis de maestría Universidad Nacional de Colombia Sede Medellin. 2006. 97p.

Goldberg, D., Lauman, G.F. CAVITATION RESISTANT POLYMER AND COATING. Patente 4847122. Julio 1989

Hansson, C. M. and Hansson, I. L. H. Cavitation Erosion, ASM Metals Handbook, Vol. 18 Friction, Lubrication and Wear Technology. 1992, pp. 214-220.

Hare H.H. PROTECTIVE COATINGS, FUNDAMENTALS OF CHEMISTRY AND COMPOSITION. Technology publishing Company. 1994. 514p.

Heathcock, C.J., Protheroe, B.E., Ball, A. CAVITATION EROSION OF STAINLESS STEELS Wear, 81. 311-327. 1982

http://www.iahr.org/e-library/beijing_proceedings/theme_E/PROTECTION%20OF%20RUNNER%20BLADES.HTML

Hutchings, I.M. TRIBOLOGY: FRICTION AND WEAR OF ENGINEERING MATERIALS. Edward Arnold. 1a edición. 1992. 273p.

M. K. Das and U. N. Puntambekar PROTECTION OF RUNNER BLADES OF HYDROTURBINES USED IN HIMALAYAN TERRAIN AGAINST EROSION BY POLYMERIC COATINGS. 2001

Marchegiani A.R. CAVITACION. Notas de clase curso maquinas hidraulicas. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE. Version 1.2. 2006. 27p

Mitutoyo corporation, Roughness tester user's manual

Okada T., et. Al. RELATION BETWEEN IMPACT LOAD AND THE DAMAGE PRODUCED BY CAVITATION BUBBLE COLLAPSE. *Wear* 184 (1995) 231-239

POTTER, M. C., WIGGERT, D. C. MECANICA DE FLUIDOS. Editorial Thompson. 3ª edición. 2002. 769p.

Richman, R. H. and McNaughton, W. P. CORRELATION OF CAVITATION EROSION BEHAVIOR WITH MECHANICAL PROPERTIES OF METALS. *Wear*, 140 (1990) 63-82

Roman, J.M. et al. COMPOSITE MATERIAL RESISTANT TO WEAR AND A PROCESS FOR THEIR MANUFACTURE. Patente 5665807. Dic. 1995

Santa, J.F. ADHERENCIA Y RESISTENCIA AL DESGASTE EROSIVO DE RECUBRIMIENTOS APLICADOS POR ASPERSIÓN TÉRMICA. Tesis de maestría Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2007. 115p

Sevostianov, I. et. Al. MATHEMATICAL MODEL OF CAVITATION DURING RESIN @LM INFUSION PROCESS. *Composite Structures* 48 (2000) 197±203

Wang, Z., Zhu, J. CORRELATION OF MARTENSITIC TRANSFORMATION AND SURFACE MECHANICAL BEHAVIOR WITH CAVITATION EROSION RESISTANCE FOR SOME IRON-BASED ALLOYS *Wear* 256 (2004) 1208-1213

Wang, Z., Zhu, J. EFFECT OF PHASE TRANSFORMATION ON CAVITATION EROSION RESISTANCE OF SOME FERROUS ALLOYS *Materials Science and Engineering A358* 273-278. 2003

Ward, I.M., Sweeney, J. AN INTRODUCTION TO THE MECHANICAL PROPERTIES OF SOLID POLYMERS. Wiley. 2ª edición. 2004. 395p

Williams, J.A. ENGINEERING TRIBOLOGY. Oxford University Press. 1a edición. 1994. 488p.

9 ANEXOS