CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO MULTICÊNTRICO EM QUÍMICA DE MINAS GERAIS

Amanda Silva Olyntho Bahia

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REVESTIMENTO DE POLIURETANO PARA RECUPERAÇÃO E PROLONGAMENTO DE VIDA ÚTIL DE EQUIPAMENTOS DA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO

BELO HORIZONTE
2021

Amanda Silva Olyntho Bahia

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REVESTIMENTO DE POLIURETANO PARA RECUPERAÇÃO E PROLONGAMENTO DE VIDA ÚTIL DE EQUIPAMENTOS DA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Multicêntrico em Química de Minas Gerais como requisito para Obtenção do título de Mestre em Química.

Orientador: Dra. Patrícia Santiago de Oliveira Patricio

BELO HORIZONTE
2021

A minha família por todo apoio, em especial à minha mãe, que sempre me incentivou ao estudo e busca pelo conhecimento.

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora, Profa. Patrícia Patricio por todo suporte, ensinamentos e dedicação a fazer deste trabalho uma pesquisa possível e concreta.

As professoras e professores do Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em Química de Minas Gerais, em especial aos do CEFET-MG, pelo apoio e esforços em prol do desenvolvimento científico e do crescimento acadêmico do programa.

Ao CEFET-MG por todo o suporte oferecido que tornou possível o desenvolvimento e conclusão desse projeto.

Aos colegas do programa de pós-graduação e do IntechLab pela companhia nessa jornada, por todas as trocas de conhecimento e momentos vividos.

A todo o pessoal da Gaustec e Itaminas por acreditarem no projeto e por todo auxílio, que fizeram possível a realização desse estudo.

Ao André, minha família e amigos que, sempre presentes, me suportaram nessa trilha e, com carinho, entenderam as ausências necessárias.

A meu pai que, tenho certeza, sempre esteve presente, minha mãe e a Ni, meus maiores apoios e inspiração, a quem devo todas as minhas conquistas.

E acima de tudo, a Deus, que tornou tudo isso possível.

RESUMO

Na indústria de mineração tem-se de forma bem perceptível a problemática do desgaste dos equipamentos por mecanismos de erosão, abrasão e/ou fadiga. A natureza do material mineral e as condições de operação são apontadas como os principais motivos da redução do tempo de vida útil dos equipamentos. O desgaste representa não só o custo relacionado à substituição da peça danificada, mas também onera o processo em relação aos gastos com a mão de obra envolvida nas manutenções desses equipamentos. Na tentativa de prolongar o tempo de utilização dos equipamentos e reduzir os custos de manutenção, tem-se buscado, cada vez mais, materiais que tenham melhor resposta aos impactos causados pela natureza abrasiva do ambiente da mineração. Uma alternativa são os revestimentos de poliuretano elastoméricos nas superfícies dos equipamentos ou mesmo substituição de peças metálicas por estruturas inteiramente de polímero, com o mesmo design e funcionalidade, mas que apresentam uma resposta tribológica melhor. O trabalho teve como objetivo geral avaliar o desempenho, em relação à resistência ao desgaste, de poliuretanos e borracha aplicados como revestimento em caixas alimentadoras de separadores magnéticos. Nove caixas de alimentação descartadas após o uso foram reformadas e receberam revestimento de borracha e dois tipos de poliuretanos de durezas 82 e 95 Shore A. Foi feita caracterização físico química dos poliuretanos elastoméricos a partir de espectrometria de infravermelho, além da medição da dureza Shore A. A influência da dureza desses elastômeros frente ao desgaste foi avaliada em operação na indústria de mineração no processo de concentração magnética do rejeito de flotação de minério de ferro. Os equipamentos foram colocados em operação em três separadores magnéticos da planta de concentração de minério da Itaminas, para avaliar, de forma comparativa, a eficiência em proteger as caixas metálicas. Registros fotográficos foram utilizados para evidenciar a evolução do desgaste dos revestimentos e o tempo de utilização das caixas foi usado como medição de performance. Avaliou-se a possibilidade de reaproveitamento das caixas de alimentação descartadas a partir da reforma e reutilização desse item. Os revestimentos de poliuretano, de ambas as durezas, apresentaram desempenho superior ao da borracha, apontando assim, melhora na operação e potencial redução de custo associado ao tempo de manutenção dos equipamentos. Embora alguns autores apontem a dureza como uma propriedade importante, nos testes realizados neste trabalho, não foi possível estabelecer relação entre o desgaste e a dureza dos elastômeros avaliados.

Palavras chave: poliuretano, revestimento, desgaste, mineração.

ABSTRACT

In the mining industry, the problem of equipment wear due to erosion, abrasion and/or fatigue mechanisms is very noticeable. The nature of the mineral material and the operating conditions are pointed out as the main reasons for the reduction in the useful life of the equipment. The wear represents not only the cost related to the replacement of the damaged part, but also burdens the process in relation to the expenses with the labor involved in the maintenance of this equipment. In an attempt to prolong the time of use of the equipment and reduce maintenance costs, more and more materials have been sought that have a better response to the impacts caused by the abrasive nature of the mining environment. An alternative is the elastomeric polyurethane coatings on the surfaces of the equipment or even the replacement of metallic parts by whole polymer structures, with the same design and functionality, but which presents a better tribological response. The general objective of the work was to evaluate the performance, in relation to wear resistance, of polyurethanes and rubber as a coating on magnetic separator feeder boxes. Nine food boxes discarded after use reformed and received rubber coating and two types of polyurethanes of hardness 82 and 95 Shore A. The physico-chemical characterization of the materials was made using infrared spectrometry, in addition to the hardness of shore A. The influence the hardness of these elastomers against wear was evaluated in operation in the mining industry in the process of magnetic concentration of iron ore flotation tailings. The equipment was transported in operation in three magnetic separators at the Itaminas ore concentration plant, to assess, in a comparative way, the efficiency in protecting the metal boxes. Photographic records were used to evidence the evolution of the wear of the coatings and the time of use of the boxes was used as used for performance. We recorded the possibility of reusing the food boxes discarded after the reform and reuse of this item. Polyurethane coatings, both as hardness, superior performance to rubber, an approach that improves operation and potential cost reduction associated with equipment maintenance time. Although some authors point out the hardness as an important property, in the tests carried out in this work, it was not possible to establish the relationship between the wear and the hardness of the adopted elastomers. Physicochemical characterization of the elastomeric polyurethanes was made using infrared spectrometry, and the evaluation of hardness Shore . The influence of the hardness of this elastomer against wear was evaluated. The equipment was allocate in operation in the magnetic separator at the Itaminas ore concentration plant, to assess, in a comparative way, the efficiency in protecting the metal boxes. Photographic records were used to evidence the evolution of the wear of

the coatings and the time of use of the boxes in the separators was used as a performance measurement. The possibility of reusing discarded food boxes after the renovation and reuse of this item was evaluated as an alternative for the disposal and accumulation of material in the operational areas. The polyurethane coatings, of both hardnesses, presented a superior performance to that of rubber in terms of use in separators, thus pointing to an improvement in the operation of the boxes and a potential cost reduction associated with the equipment maintenance time. Although some authors point out the hardness as an important property, in the tests carried out in this work, it was not possible to establish a relationship between the wear and the hardness of the evaluated elastomers.

Keywords: polyurethane, coating, wear, mining.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
2. OBJETIVOS 15
2.1 Objetivos gerais 15
2.2 Objetivos específicos 15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
3.1 Polímeros 15
3.2 Poliuretano 20
3.3 A estrutura dos poliuretanos 21
3.3.1 O poliuretano elastomérico 24
3.3.2 O processo de produção de poliuretanos elastoméricos por vazamento 27
3.4 Borracha 27
3.5 Separação Magnética e Equipamentos 29
3.5.1 O processo de separação magnética 29
3.5.2 A caixa de alimentação 33
3.6 Aspectos Tribológicos e Processos de desgaste 35
3.6.1 Breve histórico da tribologia 35
3.6.2 Princípios básicos de tribologia 35
3.6.2.1 O desgaste abrasivo 36
3.6.2.2 Desgaste erosivo 37
4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA 37
5. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO PROPOSTO 40
6. METODOLOGIA 41
6.1 Materiais 41
6.1.1 Ensaio mecânico 42
6.1.2 Caracterização Estrutural 42
6.2 Aplicação do revestimento de poliuretano nas caixas de alimentação 42
6.3 Reforma das caixas de alimentação e aplicação de revestimento 44
6.4 Alocação das caixas para avaliação do potencial de recuperação 45

7. RESULTADOS 46

7.1 Propriedades físico químicas e mecânicas dos revestimentos de poliuretano das caixas reformadas..... 46

7.2 Espectroscopia de absorção na região do infravermelho (FTIR) 47

7.3 Acompanhamento do desgaste das caixas novas com revestimento de poliuretano 49

7.4 Reforma das caixas para aplicação de revestimento de poliuretano 54

8. CONCLUSÃO 67

9. TRABALHOS FUTUROS 67

REFERÊNCIAS 68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema representativo da reação de poliadição do etileno (CALLISTER, 2016). 16
Figura 2. Representação esquemática da apresenta a reação de formação da poliamida 6,6 (COLOMBI, 2017)..... 17
Figura 3. Representação das estruturas moleculares dos polímeros. a) cadeira linear. b) ramificada. c) ligações cruzadas e d) reticulado (CALLISTER, 2016). 17
Figura 4. Gráfico do comportamento tensão-deformação de polímeros (CALLISTER, 2016). 19
Figura 5. Comportamento de elastômeros com ligações cruzadas quando submetidos à esforços de tensão (CALLISTER, 2016)..... 20
Figura 6. Representação da estrutura do grupo uretano (HEPBURN, 1991)..... 21
Figura 7. Representação esquemática da formação do pré-polímero (VILAR, 2004). 22
Figura 8. Representação esquemática das estruturas de ressonância do grupo isocianato (GANDOLF, 2016). 22
Figura 9. Esquema representativo da reação geral de polimerização de poliuretanos (GANDOLFI, 2016). 23
Figura 10. Representação esquemática dos domínios flexíveis e rígido das cadeias de poliuretano (PRISACARIU, 2011) adaptado..... 24
Figura 11. Representação da reação em uma etapa utilizando um diol como extensor de cadeia. 25
Figura 12. Representação da reação em uma etapa utilizando amina primária como extensor de cadeia. 25
Figura 13. Esquema da obtenção do elastômero de PU via pré-polímero com diamina. 26
Figura 14. Ligações formadas no processo de pós-cura 27
Figura 15. Processo de vulcanização da borracha e formação das ligações cruzadas (CALLISTER, 2016)..... 28
Figura 16. Curvas de tensão x deformação para borracha vulcanizada e não vulcanizada (CALLISTER, 2016)..... 29
Figura 17. Esquema da separação magnética para equipamento do tipo carrossel com 6 polos magnéticos (GAUSTEC Treinamento Pt WHIMS GHX 1400)..... 30
Figura 18. Vista completa do separador magnético Gaustec GHX 1400 (GAUSTEC, [s.d.]) 30
Figura 19. Modelo da caixa de alimentação do separador magnético Gaustec.(http://gaustec.com.br/pecas-de-reposicao/)..... 34

Figura 20. Fluxo da polpa dentro da caixa de alimentação (GAUSTEC, 2017) adaptado. 34
Figura 21. Representação dos quatro modos de desgaste (BHUSHAN, 2000). 36
Figura 22. Representação de desgaste abrasivo em material dúctil a) e em material frágil em b) (BHUSHAN, 2000). 37
Figura 23. Caixas de alimentação retiradas de operação por desgaste do material (a) Caixa apresentado diversas deformações na parte estrutural em decorrência do desgaste. (b) Furo na tampa superior da caixa. (c) Furo lateral no interior da caixa. .. 39
Figura 24. Acúmulo de caixas de alimentação descartadas após uso. 40
Figura 25. Fotografia dos corpos de prova, nas cores laranja (superior) e vermelho (inferior) para ensaio de dureza 42
Figura 26.Fotografias dos revestimentos de poliuretano em caixas de alimentação. .. 43
Figura 27. Fotografias das caixas de alimentação da empresa Gaustec com revestimento de poliuretano. 43
Os equipamentos foram enviados para a mineradora Itaminas para serem avaliados durante as manutenções preventivas e corretivas realizadas pela equipe de Engenharia de Aplicação da Gaustec. Relatórios de desgaste com imagens das caixas de PU foram gerados para a averiguação do desempenho dos revestimentos e comparados aos dados fornecidos para as caixas de borracha entre os anos de 2014 e 2017. 43
Figura 28. Fotografia das caixas desgastadas selecionadas para recuperação. 44
Figura 29. Fotografia da caixa de alimentação revestida de borracha. 45
Figura 30. Esquema de alocação das caixas de alimentação nos separadores magnéticos. 45
Figura 31. Espectro para o poliuretano 95 e 82 Shore A. 48
Figura 32. Fotografia da Caixa do rotor superior com 20 dias de operação. 49
Figura 33. Fotografia mostrando o ponto de maior desgaste da caixa instalada no rotor inferior. 50
Figura 34. Fotogtafia mostrando o desgaste aparente no fundo da caixa. 50
Figura 35. Desgaste lateral acentuado na grade de controle de vazão e no revestimento da caixa de alimentação do rotor inferior. 51
Figura 36. Caixa do rotor superior do GHP 150 com 39 dias de operação. 51
Figura 37. Fotografia mostrando o ponto de desgaste mais acentuado na caixa do rotor superior do GHP 150. 52
Figura 38. Acompanhamento da caixa 04 do rotor inferior do GHP 150 com 49 dias de operação. 53
Figura 39. Caixa 03 do separador GHP 400 substituída por caixa reformada. 53
Figura 40. Processo de recuperação das caixas de alimentação desgastadas. 54

Figura 41. Pontos de desgaste dos elementos estruturais do interior da caixa. 54
Figura 42. Caixas de alimentação reformadas com revestimento de poliuretano. 55
Figura 43. Caixas com revestimento de poliuretano dureza 95 Shore A sendo colocadas no separador magnético GHP 400..... 55
Figura 44. Registro fotográfico do revestimento da caixa-02 na região da grade de controle de vazão da caixa..... 56
Figura 45. Registro do desgaste apresentado pela CX-03 – GHP 400 57
Figura 46. a) Caixa do rotor superior GHP 400. b) Início do desgaste lateral do revestimento no local da grade de controle de vazão. 57
Figura 47. a) Caixa-03 do rotor inferior GHP 400. b) Início do desgaste lateral do revestimento no local da grade de controle de vazão. 58
Figura 48. a) Identificação da caixa do rotor superior do separador GHP 400. b) Desgaste na estrutura de sustentação da grade de controle de vazão. c) Desgaste lateral com presença de furo na estrutura da caixa. 59
Figura 49. a) Desgaste expressivo da grade de controle de vazão com alteração do formato da grade e aumento da abertura do componente. b) Pequeno degaste na estrutura metálica posterior da caixa. c) Desgaste da grade de controle de vazão com deformação estrutural do elemento. 59
Figura 50. a) Desgaste apresentado pela CX-05 revestida de PU 95 A. b) Desgaste apresentado pela CX-05 revestida de PU 82 A. 60
Figura 51. a) Desgaste e perda da estrutura de sustentação com deslocamento da grade de controle da vazão. b) Remoção de parte do revestimento com exposição da estrutura metálica. c) Presença de furos laterais na estrutura da caixa. d) Caixa 07 retirada de operação. 61
Figura 52. a) Caixa revestida de PU 82 A retirada de operação. b) Desgaste da grade de controle de vazão e lateral do revestimento. c) Revestimento apresentava baixo desgaste. d) Furo na parte inferior da caixa permitindo extravasamento de material. 62
Figura 53. a) Ponto de alimentação do separador magnético. b) Diferença de altura entre o ponto de recebimento das caixas do rotor inferior e superior. 63
Figura 54. Desgaste da caixa do rotor superior do GHP-150. 63
Figura 55. Desgaste da caixa do rotor inferior do GHP-150. 64
Figura 56. Esquema do tempo de operação das caixas nos separadores magnéticos 64
Figura 57. Relação aproximada entre a taxa de desgaste e dureza dos poliuretanos. 66
Fonte: Hill et al (1997) (adaptada) 66

1. INTRODUÇÃO

Na indústria de mineração, em várias etapas do processamento dos minérios, tem-se de forma bem perceptível a problemática do desgaste dos equipamentos por mecanismos de erosão, abrasão e/ou fadiga. A natureza do material mineral e as condições de operação podem ser apontadas como os principais motivos da redução do tempo de vida útil dos equipamentos. As perdas decorrentes do processo de desgaste têm, não apenas o custo da reposição da máquina danificada, mas onera o processo em relação aos gastos de mão de obra envolvida na manutenção. Adicionalmente, a parada da operação impacta na produtividade relativa ao tempo do equipamento fora de operação (BRITZ, 2014). Na tentativa de prolongar a utilização dos equipamentos ou reduzir as paradas para manutenção, tem-se buscado, cada vez mais, materiais que tenham melhor resposta aos impactos causados pela natureza abrasiva dos minérios em geral. Uma alternativa são os revestimentos de poliuretano elastoméricos nas superfícies dos equipamentos ou mesmo substituição de peças metálicas por estruturas inteiramente de polímero, com o mesmo *design* e funcionalidade, mas que apresentam uma resposta tribológica melhor (HAGE JR., 1998).

O poliuretano (PU) é um polímero amplamente utilizado em diversas áreas das ciências e tecnologia. Industrialmente encontra aplicação no setor de calçados, moveleiro, construção, setor automobilístico, cadeia do frio, mineração, dentre outros. As propriedades físicas e químicas, bem como as variações de composição desses polímeros, permitiram sua utilização na forma de elastômeros, fibras, espumas, adesivos, revestimentos e até como biomateriais (BECK; TRUSS, 1998).

As diferentes rotas de síntese e combinação dos reagentes de partida, principalmente, polióis e diisocianatos, dão origem a classes de poliuretanos com diferentes propriedades. Em se tratando de características mecânicas, por exemplo, podem variar de rígido a flexíveis. As espumas flexíveis são úteis no setor moveleiro para a fabricação de colchões, estofados e travesseiros. As espumas moldadas são amplamente empregadas pelo setor automotivo, utilizadas na confecção de bancos, volantes, apoios de braço. Já as rígidas, como isolante térmico, aplicadas em equipamentos de refrigeração como freezers e geladeiras, inclusive em substituição ao poliestireno e outros materiais utilizados no interior desses dispositivos. Com função de revestimento, têm-se tintas ou vernizes a base de poliuretano, de aplicação rápida, desempenham papel de proteção em superfícies de madeira ou concreto devido à sua resistência química. Os setores de automóveis, de calçados e da construção civil ainda se apropriam do polímero na forma de adesivo. Por fim, os elastômeros de PU, que vêm

sendo aplicados no setor de mineração, em gaxetas de veículos automotivos, rodas de skates e roletes de carga (COUTINHO; DELPECH, 1999).

Os PUs elastoméricos são materiais que apresentam alto desempenho devido às suas propriedades, especialmente a resistência à abrasão, à óleos, lubrificantes, ácidos e vários solventes orgânicos, baixa deformação quando submetido à tração, boas propriedades dinâmicas de tensão e compressão. São também resistentes ao impacto e ao rasgo e apresentam alta absorção de choques. Também já é conhecido que a dureza do polímero tem grande relação com o processo de desgaste abrasivo (RAMOS NETO et al., 2003)

Uma das tendências de aplicação dos poliuretanos é sua utilização como material alternativo para corrigir ou melhorar aspectos de projetos que empregavam outros materiais com desempenho inferior (ULRICH, 2001). Um exemplo dessa substituição ou agregação do polímero, na forma de elastômero, é como revestimento de estruturas metálicas, concreto, demais plásticos, papéis, madeira entre outros tipos de substrato (COUTINHO; DELPECH, 1999).

A proposta deste trabalho é testar poliuretanos como revestimentos para caixas alimentadoras de separadores magnéticos utilizadas na indústria de mineração, principalmente no processo de concentração magnética de partículas finas do rejeito de flotação de minério de ferro. Caixas com revestimento de borracha descartadas após o uso foram reformadas e receberam revestimento de poliuretano de dureza variada. Os equipamentos foram colocados em operação para avaliar a eficiência em proteger as caixas metálicas e foi analisado o tempo em serviço dos equipamentos quando comparados às caixas de revestimento de borracha.

Os dois tipos de poliuretanos testados foram submetidos a análises de caraterização para levantamento da propriedade mecânica de dureza e caracterização físico química por FTIR. Esses dados, juntamente com as propriedades de resistência à abrasão e alongamento informados pelos fornecedores, foram comparados ao desempenho da borracha utilizada no revestimento das caixas de alimentação a fim de realizar um paralelo entre funcionalidade e características dos materiais.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho, em relação à resistência ao desgaste, de poliuretanos aplicados como revestimento em equipamentos do setor de mineração.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as propriedades físico química e mecânica de poliuretanos elastoméricos obtidos comercialmente.
- Comparar o desempenho dos revestimentos de poliuretano e de borracha natural na caixa de alimentação dos separadores magnéticos;
- Analisar a influência da dureza do poliuretano frente ao desgaste;
- Avaliar a possibilidade de reaproveitamento das caixas de alimentação descartadas utilizando revestimento de poliuretano.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Polímeros

A documentação da história da humanidade sempre esteve associada aos mecanismos encontrados pelo ser humano para garantir sua sobrevivência e melhorar sua qualidade de vida. Intimamente ligado ao seu desenvolvimento, estão associadas a disponibilidade e capacidade de transformar e usufruir dos materiais. Tal relação pode ser percebida, por exemplo, na nomeação das Idades que, cronologicamente demarcam a história humana, a Idade da Pedra, do Fogo, do Aço, por exemplo (HAGE JR., 1998).

A partir do século XX, observou-se uma evolução no desenvolvimento de tecnologias associadas às descobertas das áreas de Química e Física e, dentre essas, tem-se muito pronunciado, o desenvolvimento dos polímeros. Borrachas, fibras sintéticas, embalagens, termoplásticos injetados inseridos no setor automobilístico, polímeros termomoldados na construção civil, biopolímeros nas áreas da saúde. Segundo Hage Jr (1998), o desenvolvimento dessa classe de materiais foi tão expressivo que o autor julga não achar exagero que futuros historiadores tratem esta época como a Idade dos Polímeros.

A criação da palavra “polímero” é atribuída a Jacob Berzelius e foi utilizada, em 1832, para caracterizar compostos de alto alta massa molar, contrapondo o termo “isômero” que era se referia à compostos com igual massa molar, porém, de estruturação diferente (HAGE JR., 1998). O processo de formação dos polímeros é denominado polimerização e o mesmo se dá a partir de ligações sucessivas entre os monômeros, formando longas cadeias carbônicas. Para que a reação de polimerização

ocorra é necessário que as moléculas precursoras tenham no mínimo dois grupos reativos (ou funcionais). Na literatura, encontram-se duas classificações para as reações de polimerização, poliadição e policondensação (BALDAN, 2015).

Segundo Mano (2004), o mecanismo envolvido na poliadição é constituído da iniciação, propagação e terminação. A cadeia polimérica é composta com carbonos regularmente distribuídos, ligados covalentemente. Monômeros iguais se ligam aos centros ativos e vão sendo adicionados sucessivamente, gerando novos centros ativos e promovendo o crescimento da cadeia. A terminação acontece com a inativação desses centros, reagindo-se o polímero em formação com espécies químicas que ocasionarão o fim do processo de propagação da cadeia. Nesse caso, não há formação de subprodutos.

Um exemplo de polimerização por adição é esquematizado na Figura 1, representando a formação do polietileno a partir do etileno (C_2H_4), em (a). Sob condições apropriadas, o monômero reage com um iniciador ou catalizador, representado por $R\cdot$, em (b). Sequencialmente, unidades monoméricas são adicionadas ao sítio ativo ou elétron desemparelhado (·), que vai sendo transferido para o próximo monômero terminal, promovendo o crescimento da cadeia (c) (CALLISTER, 2016).

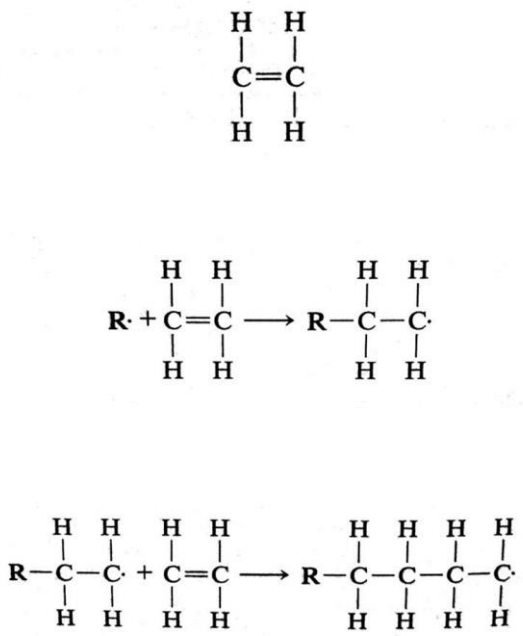


Figura 1. Esquema representativo da reação de poliadição do etileno (CALLISTER, 2016).

Já o processo por policondensação, a cadeia carbônica é heterogênea uma vez que é formada por dois monômeros diferentes entre si. Não há distinção entre o início e o final da reação como no caso anterior, e o término se dá pelo consumo dos reagentes.

Neste tipo de mecanismo há formação de subprodutos (MANO, 2004). A Figura a seguir exemplifica o processo de polimerização da poliamida com liberação de água.

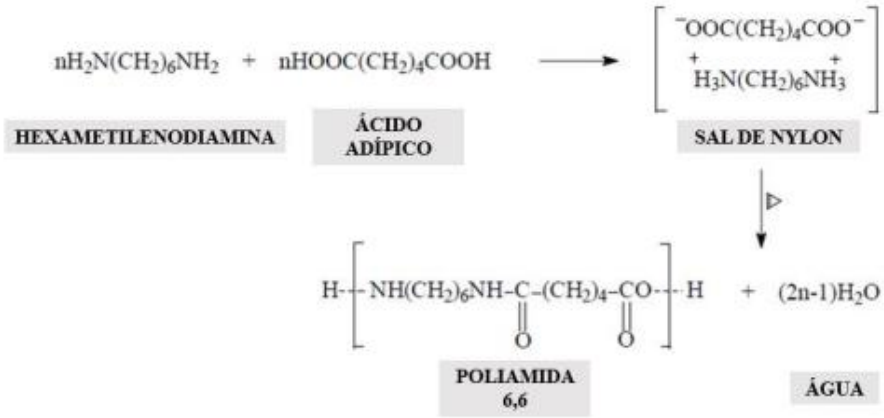


Figura 2. Representação esquemática da apresenta a reação de formação da poliamida 6,6 (COLOMBI, 2017).

Além da classificação quanto ao tipo de formação, os polímeros podem ser categorizados quanto à origem, sendo natural ou sintético e quanto a estrutura química linear, ramificado ou reticulado. Essa divisão é mostrada na Figura 3

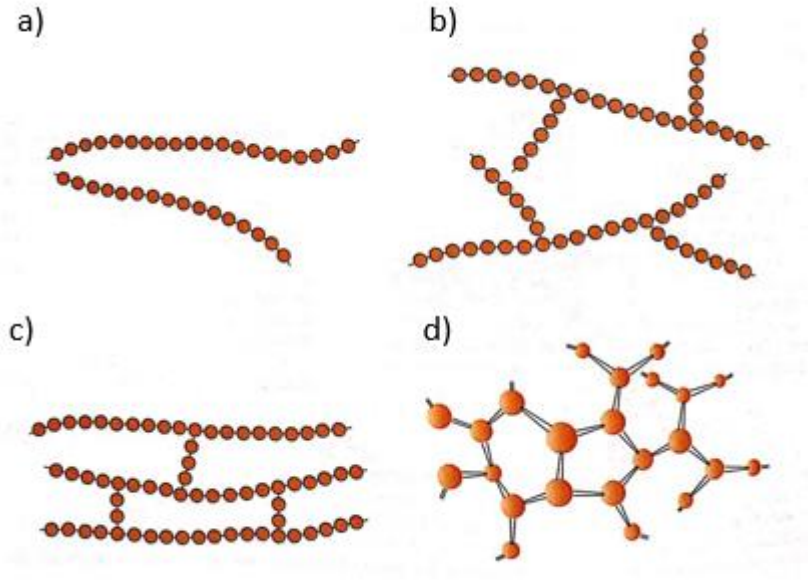


Figura 3. Representação das estruturas moleculares dos polímeros. a) cadeira linear. b) ramificada. c) ligações cruzadas e d) reticulado (CALLISTER, 2016).

Segundo Vilar (2004), utilizando-se monômeros difuncionais, a polimerização resulta em uma estrutura linear (a), não existindo ligações primárias entre cadeias vizinhas. Somente interações secundárias do tipo ligações de hidrogênio ou van der Waals são estabelecidas nesse tipo de estrutura, que necessitam de baixa quantidade de energia para serem rompidas. Já nas ramificadas (b), apresentam cadeias laterais

ao eixo principal. Também não são formadas ligações primárias entre cadeias vizinhas, somente ligações secundárias.

A polimerização de monômeros bifuncionais ou multifuncionais, com vários sítios reativos leva a formação de estruturas como vistas em (c) e (d). Em (c), observa-se a estrutura com ligações cruzadas, nesse caso, são estabelecidas ligações primárias entre as cadeias principais. E em (d) grande quantidade de ligações formam uma rígida estrutura tridimensional, reticulada (SANTOS, 2017).

Em relação as características de fusibilidade podem ser termoplásticos e termorrígidos e, quanto à heterogeneidade da cadeira, se formados por um único tipo de unidade repetitiva, denominam-se homopolímeros e copolímero quando formados por dois duas ou mais unidades repetitivas (MORASSI, 2013).

Um dos tipos de classificação dos polímeros, subdivide-os de acordo com sua resposta à exposição em temperaturas elevadas, quando submetidos a forças mecânicas. Os termoplásticos apresentam amolecimento ao serem aquecidos, e, retomam o endurecimento ao serem resfriados. Esse processo é reversível e pode ser repetido. A explicação para esse comportamento se deve ao fato que, com a elevação da temperatura, as interações intermoleculares entre as cadeias carbônicas adjacentes diminuem, devido ao aumento de agitação das moléculas. Dessa forma, aplicando se uma tensão ao material, o movimento de deslizamento das cadeias é facilitado, promovendo o derretimento ou fusão do material. São exemplos de termoplásticos o polietileno, o poliestireno e o policloreto de vinila (CALLISTER, 2016).

Os polímeros que têm monômeros multifuncionais e formam ligações covalentes tridimensionais resultando em redes e ainda aqueles que apresentam ligações cruzadas do tipo covalentes entre as cadeias adjacentes, são os chamados termorrígidos. Sua formação se dá com aumento de temperatura e sob pressão controlada, condições nas quais amolecem, se tornam fluidos, reagindo quimicamente formam as ligações cruzadas que dão rigidez ao material. Para essa classe, quando submetidos à tensão sob elevação de temperatura posterior ao processo de polimeriação, as ligações covalentes tendem a fazer as cadeias carbônicas resistirem ao movimento vibracional e rotacional, mantendo a estrutura do material mais rígida que os termoplásticos. Se o aumento de temperatura foi muito grande, a energia fornecida promove o rompimento de ligações covalentes da cadeia e degrada o material, diferentemente dos materiais descritos termoplásticos, essa quebra na estrutura é irreversível. São exemplos a borracha, as resinas epóxi, poliéster e resina de fenol-formaldeído (baquelite) (CANEVAROLO JR., 2006).

Em relação ao seu comportamento mecânico e consequente aplicação final, os polímeros podem ser divididos em plásticos – flexíveis e rígidos, elastômeros e fibras, uma classificação bastante útil do ponto de vista tecnológico (LUCAS et al., 2001). O princípio dessa segmentação leva em consideração o comportamento mecânico e pode ser bem explicada pela figura 4 que apresenta o gráfico de tensão deformação de cada classe (CALLISTER, 2016).

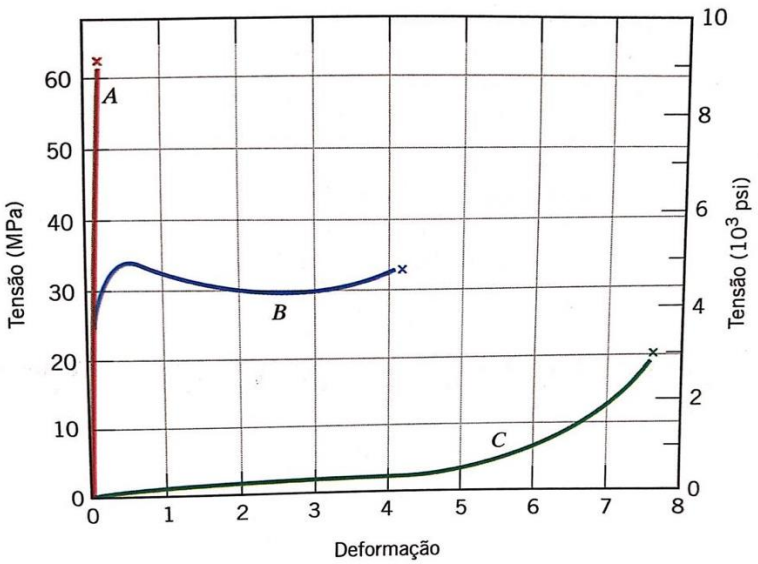


Figura 4. Gráfico do comportamento tensão-deformação de polímeros (CALLISTER, 2016).

Em A, tem-se o comportamento frágil, apresentando fratura ainda na deformação elástica. Apresentam alto módulo de elasticidade e elevado limite de resistência atração. Essas são características das fibras, macromoléculas lineares, orientadas de modo forçado durante o processo de fiação, possibilitando o uso na forma de fios finos. Possuem relação entre o comprimento e o diâmetro maior ou igual a 100 $(L/D \geq 100)$ (CANEVAROLO JR., 2006).

O gráfico B, o comportamento observado é a deformação elástica, presença de escoamento seguido de deformação plástica até a ruptura, características dos plásticos, semelhante ao desempenho de vários metais. O termo plástico é de origem grega e significa "adequado à moldagem". Segundo Mano (2004), um material macromolecular sólido no estágio final de processamento, que tenha passado por um período fluido no qual se tem a moldagem pela ação conjunta de temperatura e pressão.

E por fim, em C, o comportamento dos elastômeros, tipicamente elástico, exibindo grandes deformações retornáveis em baixos níveis de tensão. Provavelmente a primeira observação dessas características foi na borracha natural. Como mostrado na figura 5, esses polímeros são amorfos, formados por longas cadeiras espiraladas, altamente torcidas e dobradas umas sobre as outras, tendo como pontos de ancoragem,

as ligações cruzadas entre as cadeias adjacentes (a). Quando submetidos à tensão, as cadeias se desenrolam e apresentam alinhamento parcial na direção do esforço σ (b). Retirada a aplicação da força, as cadeias retornam a sua posição original (CALLISTER, 2016).

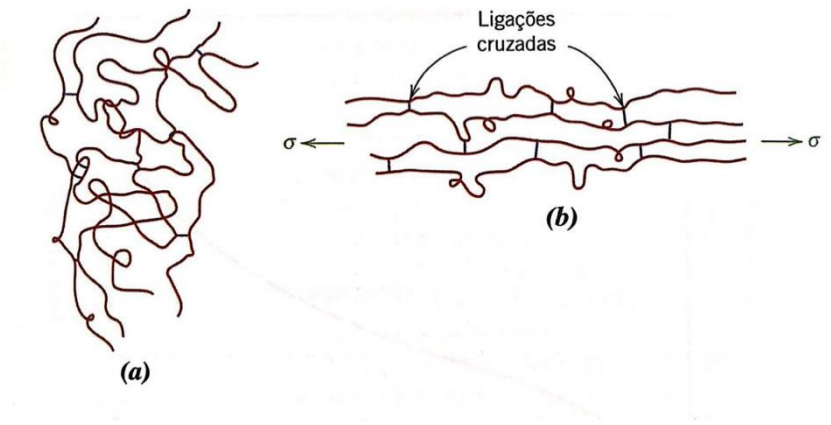


Figura 5. Comportamento de elastômeros com ligações cruzadas quando submetidos à esforços de tensão (CALLISTER, 2016).

De acordo com o autor, parte da força motriz da deformação elástica dos elastômeros está relacionada a entropia. O alinhamento e ordenação parcial das cadeias poliméricas diminui a entropia do sistema, dessa forma, o caminho natural é alcançado com o retorno às posições iniciais, que promove o aumento do parâmetro termodinâmico. A continua aplicação de tensão sob o sistema elastomérico promove o rompimento das ligações cruzadas e leva à fratura do material.

3.2 Poliuretano

Diferentemente de alguns polímeros resultados de descobertas acidentais, o poliuretano é um polímero sintético. O PU foi produzido e patenteado em 1937 por Otto Bayer. As primeiras pesquisas do químico e professor alemão com cadeias uretânicas, utilizando diisocianatos, levaram a criação de uma espuma rígida. A princípio, o estudo era destinado ao desenvolvimento de um material concorrente da poliamida - o Nylon patenteado pela DuPont®. O aprimoramento da técnica de síntese dessa substância química promoveu o desenvolvimento de uma versátil linha de polímeros (VALIM, 2012).

Os aspectos históricos desse material, no entanto, datam de antes de 1850 quando Wurtz e Hoffman estudaram as propriedades dos diisocianatos aromáticos e alifáticos. Naquela época, porém, a dificuldade encontrada no método de preparação dessas matérias primas, fez os cientistas perderem o interesse na pesquisa. Em 1884,

Hentschel, desenvolveu a fosfogenação das aminas, um método mais assertivo para a preparação de diisocianatos. Ainda assim, as pesquisas com esses materiais só foram expressivamente retomadas nos laboratórios alemães, próximo a 1930. Os *Farben Laboratories*, uma subdivisão da Bayer, quando Heinrich Rinke preparou pela primeira vez o diisocianato de 1,6-hexametileno (HDI). Juntamente com Otto Bayer, desenvolveram o processo de poliadição de diisocianato. (PRISACARIU, 2011).

As primeiras reações deram origem a espumas, e Pinten, em 1940, desenvolveu as primeiras borrachas de poliuretano conhecidos como *"I-Gummi"*. Apresentavam resistência à abrasão e alta resistência à tração, porém baixa resistência ao rasgo e propriedades consideradas insuficientes quando em baixas temperaturas (PRISACARIU, 2011)

Os primeiros poliuretanos comerciais foram produzidos pela Bayer-Fabenfabriken e nos Estados Unidos por B.F. Goodrich. Posteriormente, por volta de 1952, quando os poliisocianatos se tornaram disponíveis comercialmente, houve maiores desenvolvimentos na área. O primeiro poliol poliéter foi comercializado pela DuPont, em 1956, e obtido pela polimerização do tetra-hidrofurano. O mercado de poliuretano começou a se desenvolver na década de 1970 e a capacidade de produção começou a crescer rapidamente. A indústria se tornou dominada por grandes empresas químicas como a Bayer & BASF na Alemanha, ICI no Reino Unido, Dow Chemical e Upjohn Polymer Chemicals nos Estados Unidos (PRISACARIU, 2011).

3.3 A estrutura dos poliuretanos

A reação de formação do poliuretano se dá entre um isocianato - di ou poli funcional - e um hidrogênio ativo. Muitos outros reagentes podem ser adicionados ao processo como agentes de cura, catalisadores, surfactantes, desmoldantes, agentes de expansão, cargas, pigmentos, etc. Esses, associados à grande variabilidade de precursores e condições de reação, fornecem uma vasta gama de tipos de poliuretano, sendo encontrados na forma de espuma rígida, flexível ou moldada, filme, termoplástico, tintas e revestimentos, adesivos e ainda elastômeros (VILAR, 2018).

O poliuretano é resultado da repetição de uma unidade estrutural, o grupo uretano, conforme estrutura apresentada na Figura 6:

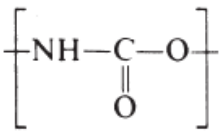


Figura 6. Representação da estrutura do grupo uretano (HEPBURN, 1991).

A Figura 7 mostra o esquema geral de formação do pré-polímero a partir de um diisocianato e um diol. O grupo denominado NCO reage com os hidrogênios ativos do poliol originando uma nova função classificada como uretana.

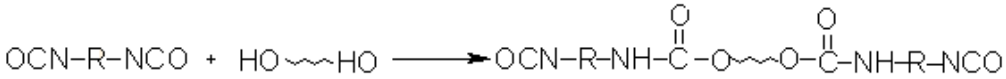


Figura 7. Representação esquemática da formação do pré-polímero (VILAR, 2004).

As reações do grupo NCO com os hidrogênios ativos, quando provenientes de diferentes grupos funcionais, diois, diaminas, poliois poliéteres, poliésteres, dentre outros, podem levar a obtenção de diferentes produtos como apresentados a seguir:

$$RNCO + R'OH \rightarrow RNHCOOR' \qquad Uretano\ (1)$$

$$RNCO + R'NH_2 \rightarrow RNHCONHR' \qquad Uréia (2)$$

$$RNCO + R'COOH \rightarrow RNHCOR' + CO_2 \qquad Amida\ (3)$$

$$RNCO + H_2O \rightarrow [RNHCOOH] \rightarrow RNH_2 + CO_2 \xrightarrow{RNCO} RNHCONHR \qquad Uréia\ (4)$$

As reações (3) e (4) que liberam dióxido de carbono, tem valor na elaboração de produtos com espuma, mas são dificultadores se forem necessárias para a obtenção de peças vazadas sem bolhas e revestimentos de superfície contínuos (HEPBURN, 1991).

O isocianato precursor pode ser representado, genericamente, como:

$$R' - (-N = C = O)_n$$

em que *R*' representa uma cadeia aromática ou alifática. O subíndice *n* se refere à funcionalidade do composto, podendo ser igual ou superior a 2, diisocianato e poliisocianato, respectivamente. O grupo apresenta estruturas de ressonância conforme mostrado na Figura 8 (GANDOLF, 2016):

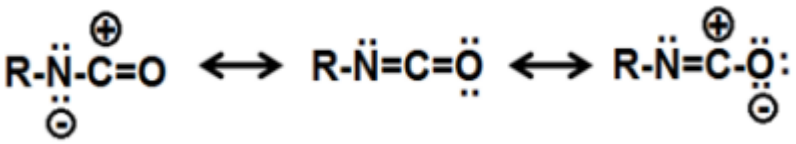


Figura 8. Representação esquemática das estruturas de ressonância do grupo isocianato (GANDOLF, 2016).

O átomo de carbono carregado positivamente é atacado pelo par de elétrons do heteroátomo, ocorrendo simultaneamente a transferência do átomo de hidrogênio ativo para o átomo de nitrogênio, quebrando a dupla ligação nitrogênio-carbono, que originam a função uretana conforme o mecanismo simplificado representado na Figura 9 (KLOSS et al., 2007):

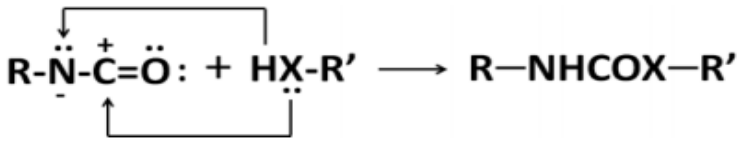


Figura 9. Esquema representativo da reação geral de polimerização de poliuretanos (GANDOLFI, 2016).

Alguns dos compostos com hidrogênio ativo e sua reatividade com os isocianatos seguem representados no Quadro 1. As possibilidades de formação do poliuretano podem ser controladas e adaptadas de forma a gerar inúmeros produtos, para diferentes tipos de aplicação (CABRAL, 2012).

Quadro 1. Esquema representativo da reação geral de polimerização de poliuretanos (GANDOLFI, 2016).

COMPOSTO COM HIDROGÊNIO ATIVO	ESTRUTURA TÍPICA	TAXA DE REAÇÃO RELATIVA (SEM CATALISAÇÃO, A 25°C)
Amina alifática primária	$R - NH_2$	100.000
Amina secundária alifática	$R_2 - NH$	20.000 – 50.000
Amina aromática primária	$Ar - NH_2$	200 – 300
Hidroxila primária	$R\text{-}CH_2\text{-}OH$	100
Água	H-O-H	100
Ácido carboxílico	$R\text{-}\overset{\overset{O}{\|\|}}{C}\text{-}OH$	40
Hidroxila secundária	$R\text{-}\overset{\overset{R}{\|}}{C}H\text{-}OH$	30
Ureias	$R\text{-}NH\text{-}\overset{\overset{O}{\|\|}}{C}\text{-}NH\text{-}R$	15
Hidroxila terciária	$R\text{-}\overset{\overset{R}{\|}}{\underset{\underset{R}{\|}}{C}}\text{-}OH$	0,5
Uretana	$R\text{-}NH\text{-}\overset{\overset{O}{\|\|}}{C}\text{-}O\text{-}R$	0,3
Amida	$R\text{-}\overset{\overset{O}{\|\|}}{C}\text{-}NH_2$	0,1

Alguns grupos tendem a aumentar a reatividade dos grupos NCO, ao passo que, outros podem reduzi-las, são eles os agentes nucleofílicos e os doadores de elétrons, respectivamente. Grupos isocianatos aromáticos são, portanto, mais reativos que os alifáticos. Além disso, a geometria espacial e possíveis impedimentos histéricos podem afetar a reatividades dos compostos (GANDOLF, 2016).

3.3.1 O poliuretano elastomérico

Os elastômeros de PU podem ser produzidos pela reação, em uma ou em duas etapas de um isocianato, um poliol de alta massa molar e um extensor de cadeia de baixa massa molar, podendo ser um diol, uma diamina ou a água (VILAR, 2004). Segundo PRISACARIU (2011), os polímeros resultantes podem ser considerados um copolímero da sequência de extensores de cadeia, poliol e diisocianato, que formam uma sucessão de segmentos flexíveis (SF) e rígidos (SR) conforme mostrado na Figura 10:

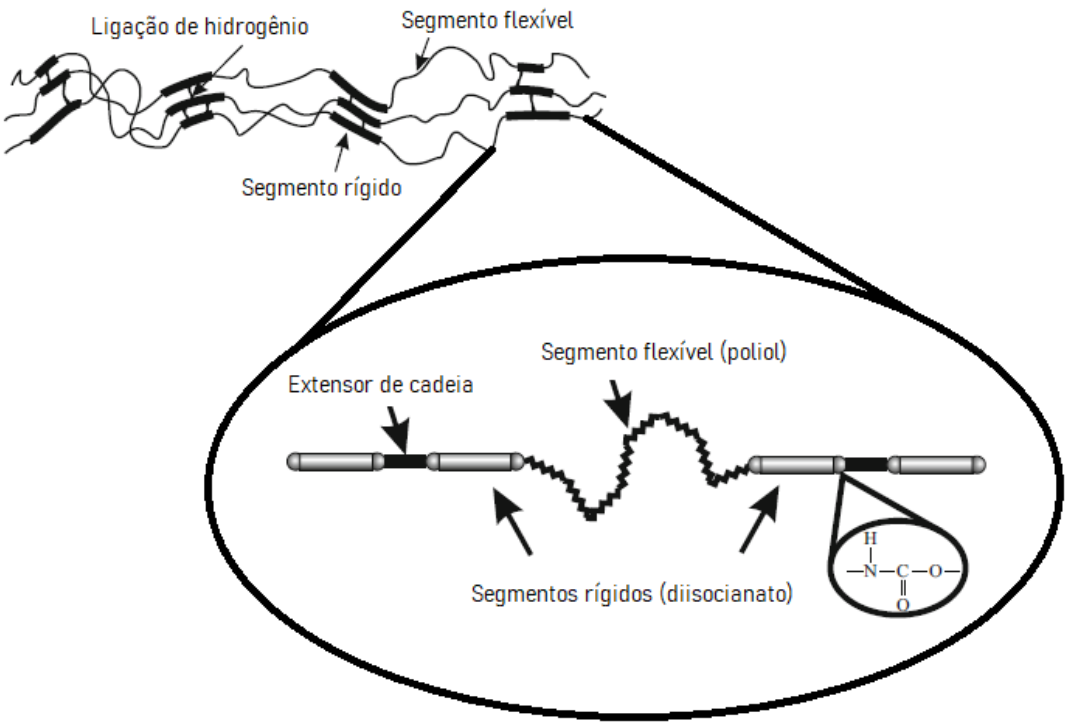


Figura 10. Representação esquemática dos domínios flexíveis e rígido das cadeias de poliuretano (PRISACARIU, 2011) adaptado.

No processo conduzido em uma etapa, todos os componentes são colocados em contato ao mesmo tempo, diisocianato com um poliol e um extensor de cadeia. O sistema pode ser estendido utilizando-se um diol de cadeia curta com baixa massa molar ou uma amina primária, conforme mostrado nas Figuras 11 e 12 (ROCHA et al., 2013).

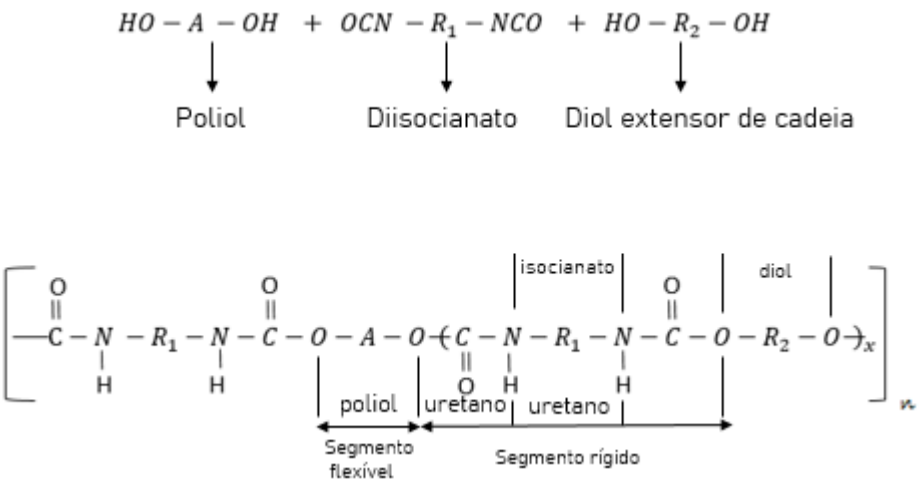


Figura 11. Representação da reação em uma etapa utilizando um diol como extensor de cadeia.

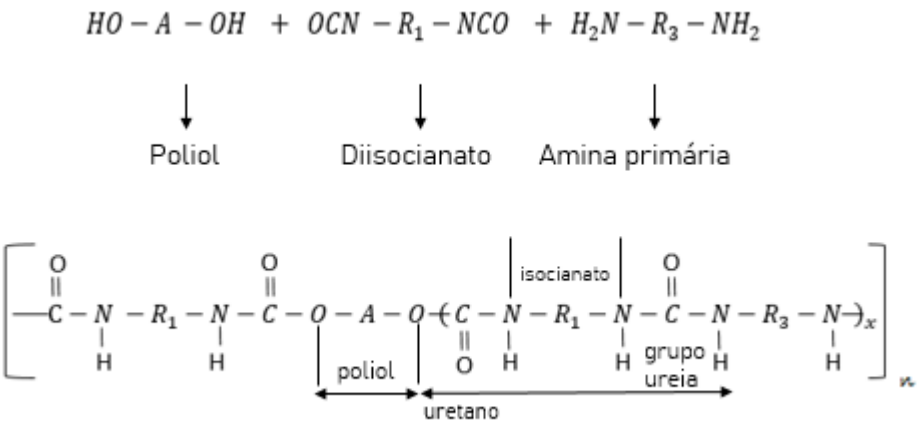


Figura 12. Representação da reação em uma etapa utilizando amina primária como extensor de cadeia.

Na polimerização em duas etapas, Figura 13, produz-se um pré-polímero a partir da reação de um poliol com um excesso de diisocianato, seguido de extensão da cadeia com um diol de baixa massa molar (uretano ou éster) ou uma diamina (ureia, amida ou éster-amida) que levam ao aumento da massa molar total do polímero. Esse processo é mais controlado se comparado ao feito em uma etapa e assim, produz cadeias lineares de PU, com menos reações secundárias indesejadas (PRISACARIU, 2011).

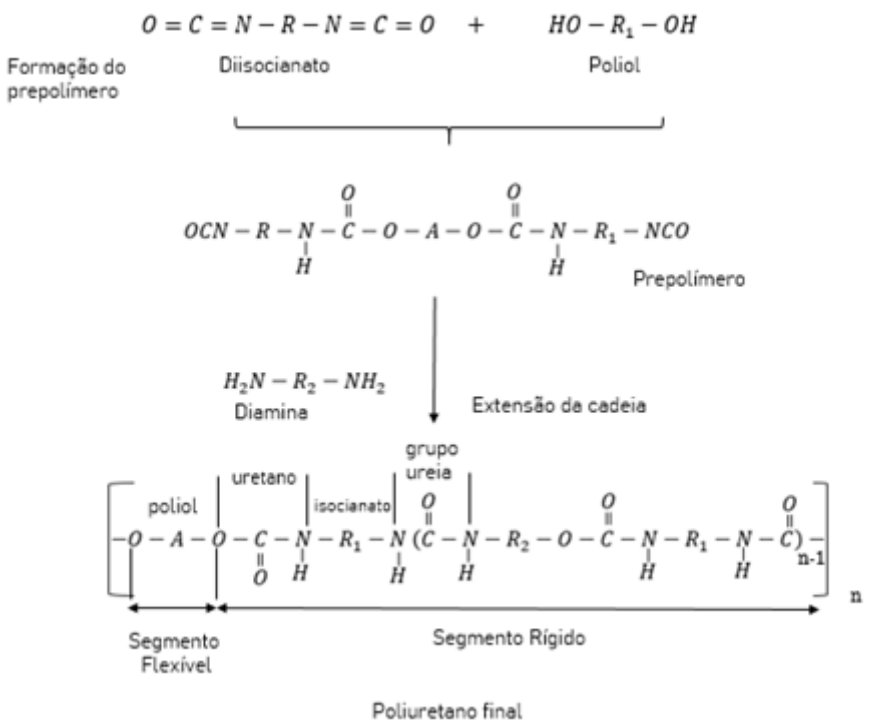


Figura 13. Esquema da obtenção do elastômero de PU via pré-polímero com diamina.

Na síntese em duas etapas, o poliol liga-se ao diisocianato e, em seguida, conecta esses oligômeros aos extensores de cadeia. Isso fornece uma sequência “SF-SR-SF-SR” mais regular do que na rota de síntese em uma etapa. A regularidade dessa estrutura leva a melhores propriedades mecânicas, já que os seguimentos rígidos se agregam e/ou cristalizam com mais facilidade para formar interações de hidrogênio, denominadas na literatura específica como “pontos de reticulação física” (PRISACARIU, 2011).

O percentual de NCO reativo na cadeia em relação à sua massa molar total correlaciona-se com as propriedades finais do elastômero. Para poliuretanos gerados pelos mesmos precursores, aumentando-se do teor de NCO do pré-polímero, tem-se em aumento da dureza do polímero resultante (ROCHA et al., 2013).

Quando o agente de cura utilizado no processo de extensão de cadeia possui dois ou mais grupos funcionais ou ainda, quando se processa a reação com excesso de isocianato em relação ao poliol, os grupos NCO que não reagiram na primeira etapa do processo, formam ligações com o grupo uretano das cadeias poliméricas, denominadas ligações cruzadas de alofanato e biureto, Figura14. É durante essa pós-cura que se alcançam as propriedades finais, podendo ser feita em altas temperatura da ordem de 70 °C por um tempo de aproximadamente 16 horas ou em temperatura ambiente por uma semana (VILAR, 2018).

$$R-NH-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-NH-R' \quad + \quad R-N=C=O \quad \rightarrow \quad \begin{array}{c} \overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{R-N-C}-NH-R' \\ | \\ O=C-NH-R \end{array}$$

Biureto

$$R-NH-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-OR' \quad + \quad R-N=C=O \quad \rightarrow \quad \begin{array}{c} \overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{R-N-C}-OR' \\ | \\ O=C-NH-R \end{array}$$

Alofanato

Figura 14. Ligações formadas no processo de pós-cura

Utilizando-se um extensor de cadeia do tipo diol, as ligações formadas são do tipo uretana e alofanato, ao passo que, empregando-se extensor de cadeia do tipo diamínico, como o 4,4'-metileno-bis(2-cloroanilina), estarão presentes as ligações do tipo uréia e biureto (HAMESTER, L. S. , SANTANA, R. M. C., FORTE, 2009).

3.3.2 O processo de produção de poliuretanos elastoméricos por vazamento

O processo de produção dos PUs elastoméricos moldados por vazamento se inicia com a preparação dos reagentes, o pré-polímero e o agente de cura. O pré-polímero é aquecido até sua temperatura de trabalho. O aquecimento promove aumento da fluidez e melhoria das condições de manuseio do reagente. Porém, ainda viscoso, o material é submetido ao processo de desaeração para retirada de bolhas do seu interior. Esse procedimento é normalmente realizado utilizando-se bombas à vácuo (VILAR, 2004).

O segundo componente, o agente de cura, é também aquecido até a temperatura adequada e os dois são colocados em contato. Essa etapa ocorre sob agitação de modo a homogeneizar a mistura, mas sem ocasionar bolhas, já retiradas durante o processo de desaeração anterior. Posteriormente, a mistura é vertida no molde previamente aquecido que é então mantido sob aquecimento para que ocorra a cura do material. Ao molde, adiciona-se antes do preenchimento, substâncias para facilitar o processo de desmoldagem. Para que as propriedades finais sejam alcançadas, após retirada do molde, a peça retorna para a estufa para a etapa de pós-cura (VILAR, 2004).

3.4 Borracha

A borracha natural é obtida a partir do látex da seringueira, árvore nativa do continente americano. Os espanhóis, ao chegarem à América no século XV, observaram

os índios usando um artefato para jogos similar a uma bola. Levado à Europa, ganhou o nome em inglês "*rubber*", que se sugere ter sido atribuído por Priestley, o primeiro a relatar o comportamento do novo material de apagar ("*rub out*") os escritos a lápis (CIESIELSKI, 1999).

A borracha foi vastamente estudada na Europa a partir das observações de utilização pelos povos indígenas americanos até que, ao final do século XVIII, a Europa e a América já usavam toneladas de material por ano. Ainda assim, era difícil trabalhar e modelar a borracha sólida. Quando submetida a elevadas temperaturas o material ficava pegajoso, já em temperaturas baixas, apresentava enrijecimento (MORTON, 1987).

A reação da borracha com enxofre resulta em uma rede de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas. Esse processo, denominado vulcanização, foi descoberto, de forma simultânea por Charles Goodyear e Thomas Hancock. Ambos patentearam a descoberta em 1840, nos Estados Unidos e na Inglaterra, respectivamente. A vulcanização aprimora as propriedades químicas e físicas da borracha se comparadas ao material não vulcanizado (COSTA et al 2003).

A reação de formação das ligações cruzadas pode ser vista na figura a seguir:

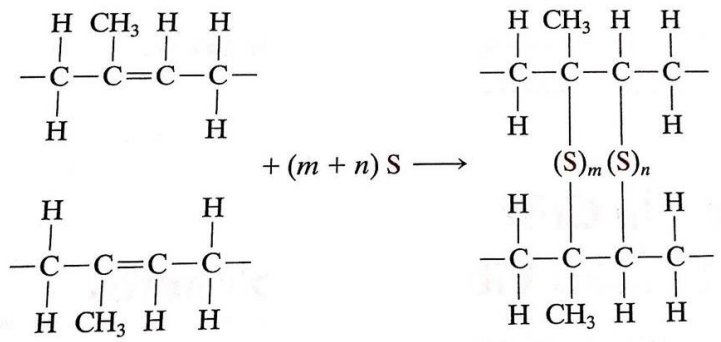


Figura 15. Processo de vulcanização da borracha e formação das ligações cruzadas (CALLISTER, 2016).

Na reação, duas ligações cruzadas são estabelecidas quando *m* e *n* átomos de enxofre (S) são adicionados à dupla ligação carbono-carbono. Essa ligação, faz a conexão entre as cadeias poliméricas adjacentes. O módulo de elasticidade, limite de resistência à tração, a resistência à abrasão e ao desgaste por oxidação aumentam com o aumento da densidade de ligações cruzadas. A figura 16 mostra a curva de tensão x deformação comparativa da borracha vulcanizada e da não vulcanizada, explicitando o ganho das propriedades mecânicas decorrentes da realização do processo (CALLISTER, 2016).

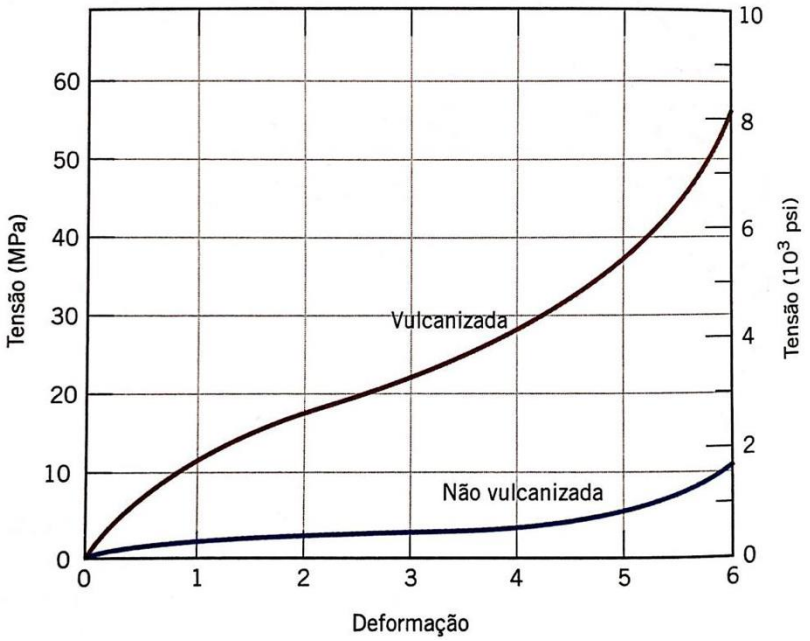


Figura 16. Curvas de tensão x deformação para borracha vulcanizada e não vulcanizada (CALLISTER, 2016).

3.5 Separação Magnética e Equipamentos

3.5.1 O processo de separação magnética

A concentração magnética é uma etapa conhecida e bastante explorada no processamento de minérios. Pode ser utilizada para concentrar e/ou purificar amostras minerais. Seu princípio utiliza-se dos diferentes comportamentos dos materiais frente ao magnetismo - a susceptibilidade magnética. Materiais ferromagnéticos, paramagnéticos ou diamagnéticos são assim classificados por serem fortemente atraídos pelo campo magnético, no caso dos primeiros, fracamente atraídos, a segunda classe citada e, aqueles que são repelidos, os últimos mencionados (LUZ; SAMPAIO, JOÃO ALVES; FRAÇA, 2010).

Existem variados tipos de separadores que se distinguem de acordo com sua forma de operar. Alguns atuam empregando elevados campos magnéticos enquanto outros, operam com baixa intensidade. Há também a diferenciação quando ao trabalho a úmido o a seco (CRISÓSTOMO, 2015).

Os Separadores Magnéticos de Alta Intensidade a Úmido, traduzido do inglês *Wet High Intensity Magnetic Separator* (WHIMS), tem seu desenvolvimento atribuído a Jones, em 1960, a partir de estudos de Frantz para magnetização de uma matriz com elevados valores de campos magnéticos aplicados (ROCHA, 2018). Seu funcionamento, para o equipamento do tipo carrossel, Figura 17, pode ser descrito acompanhando o esquema abaixo.

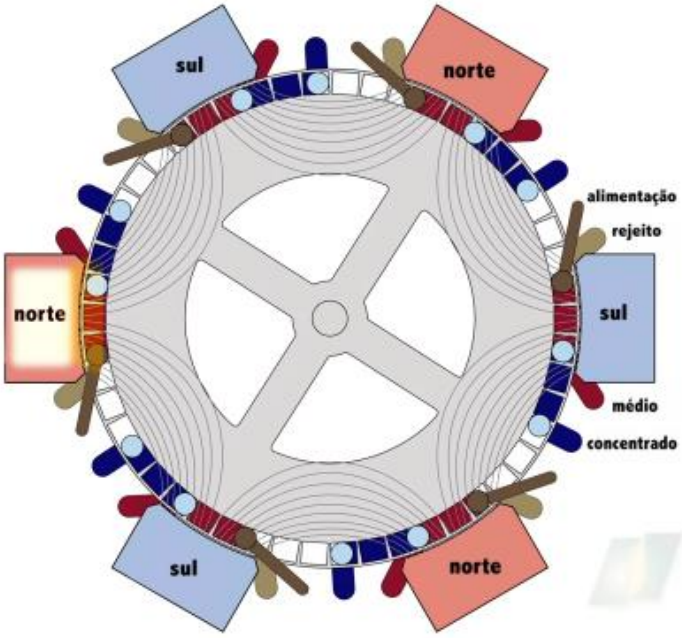


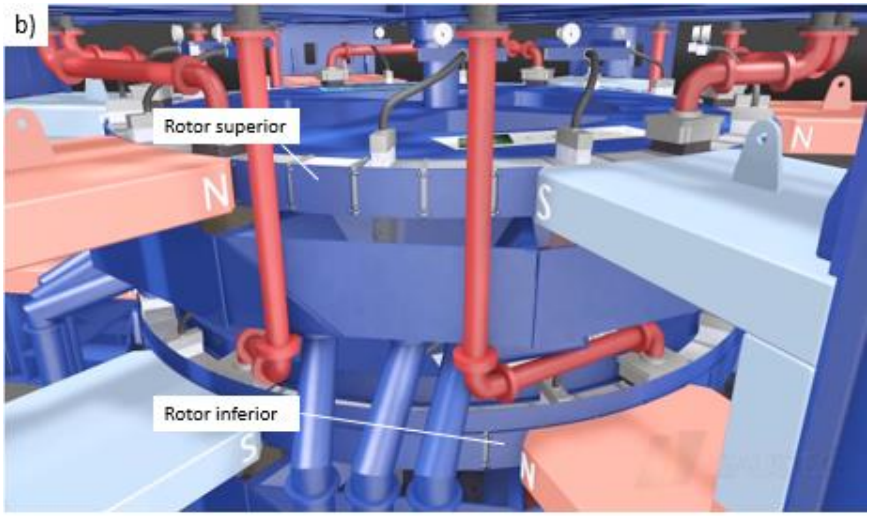
Figura 17. Esquema da separação magnética para equipamento do tipo carrossel com 6 polos magnéticos (GAUSTEC Treinamento Pt WHIMS GHX 1400).

O equipamento é composto por dois rotores, cada um com 59 matrizes magnéticas. Em cada polo, tem-se os três estágios da separação magnética, a alimentação, a liberação de médios e a recuperação do material concentrado.

O GHX 1400 é um separador magnético com capacidade de 1400 toneladas por hora de alimentação. A polpa a ser concentrada é conduzida por dutos até os sistemas de alimentação, indicados em (a) pelas setas cinza, na parte superior da figura 18.

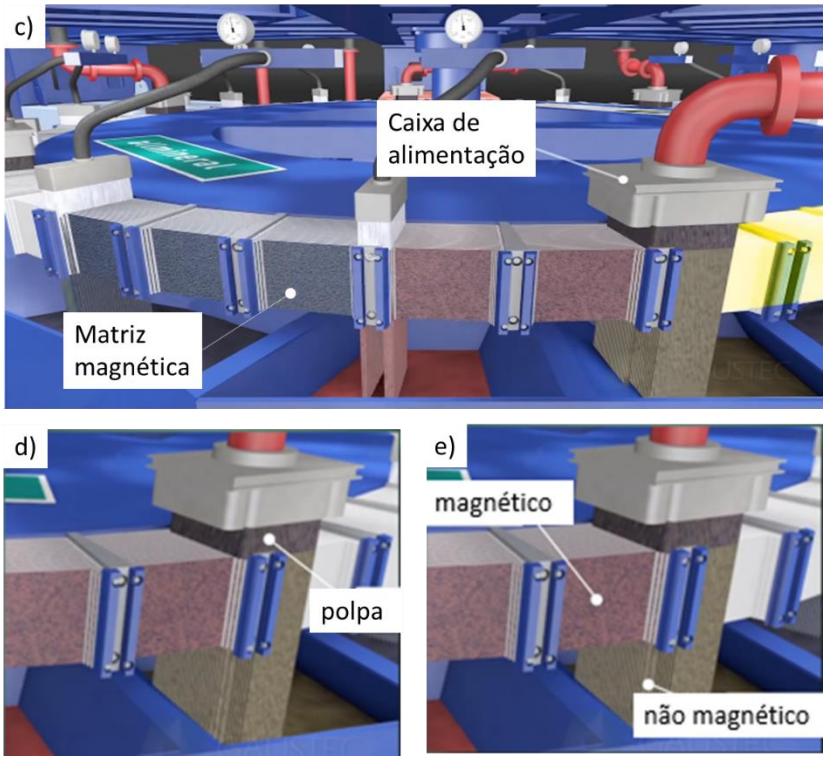
Figura 18. Vista completa do separador magnético Gaustec GHX 1400 (GAUSTEC, [s.d.])

Este equipamento é composto por dois rotores (superior e inferior) que se movimentam horizontalmente promovendo o deslocamento das matrizes magnéticas. Quando submetidas ao campo magnético, as matrizes são, também, magnetizadas por indução (RIBEIRO; RIBEIRO, 2014).

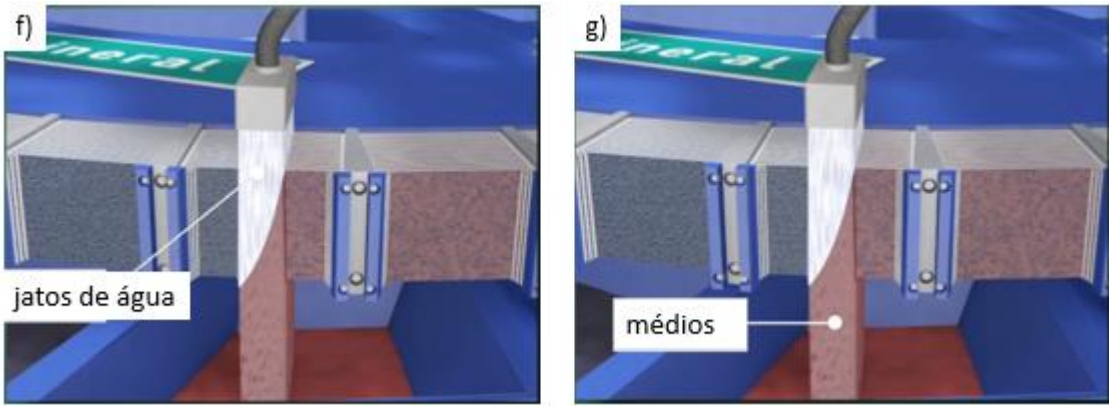


b) Vista interna do separador magnético (GAUSTEC, [s.d.]) adaptado.

A polpa bombeada através do circuito chega às caixas de alimentação (c) e, dessas segue para as matrizes (d). Pela ação do campo magnético a alimentação é separada em material magnético e não magnético (e). O material não magnético, que não aderiu às ranhuras das matrizes, flui, por gravidade, e é coletado logo abaixo, em caixas coletoras. Este é o primeiro estágio do processo de separação magnética.



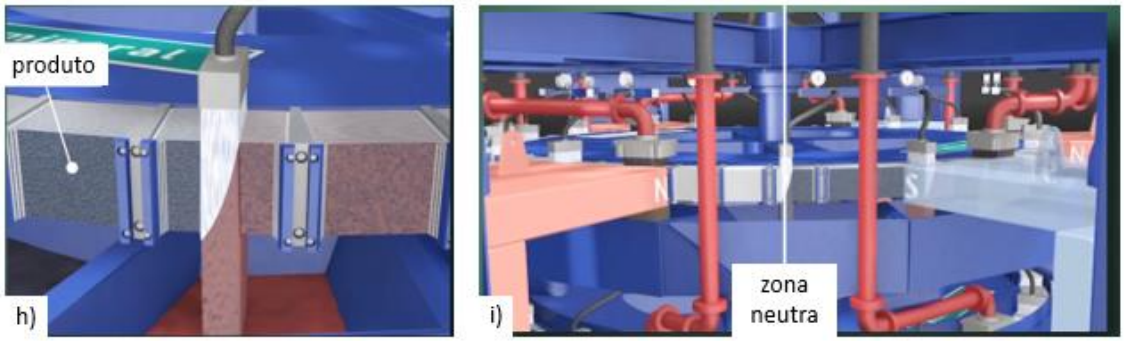
O material aderido às matrizes é lavado por jatos de água (f) com a pressão necessária para fazer com que os médios se soltem das matrizes e sejam coletados (g).



Nessa etapa, ocorre uma separação secundária do material não magnético que, por ação da força magnética é carreado e fica aprisionado junto ao material magnético nas matrizes. A presença dos médios, junto ao material de interesse, pode comprometer a qualidade do produto concentrado.

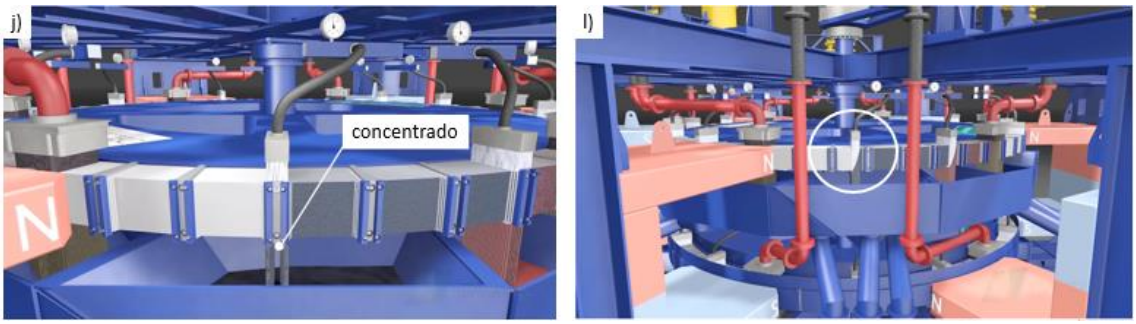
Essa lavagem promove, dentro das matrizes, uma competição entre a força magnética e o arraste hidráulico, e a definição da pressão dos jatos de água determina a quantidade de material não magnético que será lavado, afim de que se atinja a qualidade desejada na concentração. Porém, algum material magnético, também pode ser lavado juntamente com o contaminante e assim, essa porção pode, caso necessário, retornar ao processo de concentração pelo próprio circuito de alimentação, evitando a perda de material magnético (RIBEIRO; RIBEIRO, 2014).

O produto magnético (h), segue aderido às placas alcança a zona neutra (i), entre dois polos do separador magnético. Na zona neutra, tem-se a anulação entre as forças magnéticas dos polos norte e sul.



Fonte: GAUSTEC Treinamento Pt WHIMS GHX 1400 (adaptado)

Sem a atuação dessa força, o material concentrado é removido pelo jato de lavagem (j). A matriz limpa segue para o próximo ponto de alimentação e o processo recomeça (l).



Fonte: GAUSTEC Treinamento Pt WHIMS GHX 1400 (adaptado)

No processo de separação tem-se as etapas *rougher, scavenger* e *cleaner.* Em sequência, *rougher* denomina-se primeira concentração das partículas, *scavenger*, a primeira limpeza da concentração e *cleaner*, a primeira apuração do concentrado (FERROUS, [s.d.]).

A seguir dados fornecidos pela empresa Gaustec referente aos separadores magnéticos mostram a concentração de ferro e sílica em % de massa na alimentação dos equipamentos em cada etapa:

Quadro 2. Dados operacionais dos separadores magnéticos[1]

GAUSTEC MAGNETISMO

DADOS OPERACIONAIS DOS SEPARADORES MAGNÉTICOS ITM-08

TAG	MODELO	PROCESSO	% APROXIMADO DE (Fe) NA ALIMENTAÇÃO SM			% APROXIMADO DE (SiO^2) NA ALIMENTAÇÃO SM			QUANTIDADE DE CAIXAS DE ALIM.
G-3200	G-3200	CLEANER	57%			15%			4
G-3600	G-3600	CLEANER	60%			10%			4
GHP-150	GHP-150	SCAVENGER	45%			30%			4
GHP-400	GHP-400	ROUGHER	48%			25%			4
GX-3600	GX-800	ROUGHER	48%			27%			8
GHX-1400-D	GHX-1400	ROUGHER / CLEANER / RE-CLEANER	35%	58%	63%	44%	12%	7%	12
GHX-1400-E	GHX-1400	ROUGHER / CLEANER / RE-CLEANER	32%	55%	61%	47%	11%	10%	12

3.5.2 A caixa de alimentação

A caixa de alimentação, Figura 19, é um equipamento constitutivo dos separadores magnéticos que tem como função, receber a polpa, ajustando a vazão de material em cada ponto de alimentação. Sua composição, com uma grade de controle de vazão, uma paralela e uma inclinada, em conjunto, equalizam o fluxo da polpa que chega até as matrizes magnéticas do separador.

[1] Dados de relatórios fornecidos pela empresa para a pesquisa.

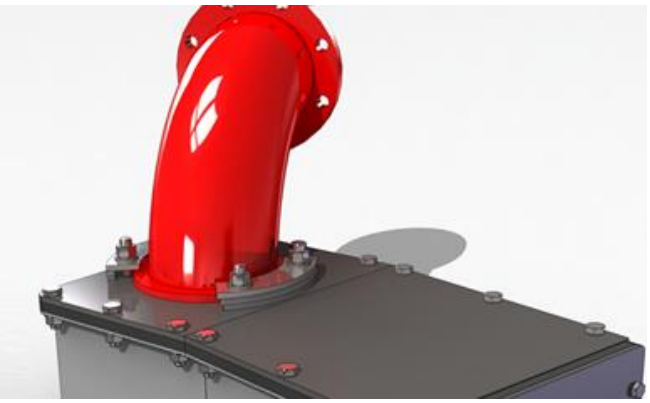


Figura 19. Modelo da caixa de alimentação do separador magnético Gaustec.(http://gaustec.com.br/pecas-de-reposicao/)

A movimentação da polpa dentro da caixa, evidenciada na Figura 20, assim com a natureza abrasiva do material, faz com que esse equipamento apresente uma vida útil, a partir da qual, é necessário realizar a substituição da peça. O tempo de uso da caixa varia com o tipo de separador magnético, as condições de operação, as características do material de alimentação, a vazão e demais parâmetros operacionais.

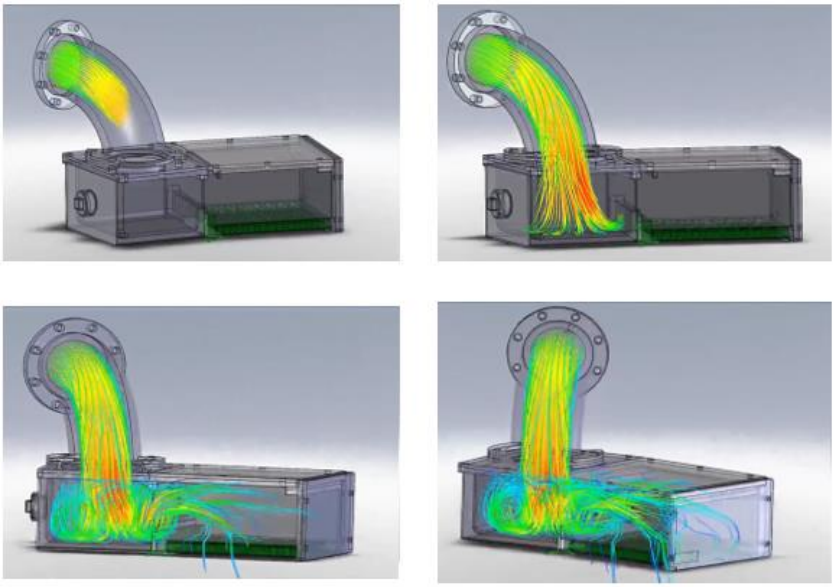


Figura 20. Fluxo da polpa dentro da caixa de alimentação (GAUSTEC, 2017) adaptado.

O fluxo da polpa em contato com as superfícies do equipamento, com o passar do tempo, promove a perda de espessura, por abrasão, e leva a formação de orifícios no dispositivo. O término de uso da caixa se dá quando há extravasamento de polpa do interior da caixa pelas aberturas formadas no processo de desgaste.

Com o intuito de prolongar a vida útil, a Gaustec passou a revestir o interior das caixas com borracha.

3.6 Aspectos Tribológicos e Processos de desgaste

3.6.1 Breve histórico da tribologia

Segundo JOST (1990) o termo “tribologia” foi introduzido pela primeira vez em 1966 em um relatório do Departamento Britânico de Educação e Ciência. De acordo com o autor, especialistas do ministério não encontraram palavra na língua inglesa, ou em qualquer outra, que traduzisse a ideia de que duas superfícies em movimento relativo interagiam entre si. Assim, o conceito foi criado, a partir do prefixo “tribo” – fricção - e “logos” – estudo. *Tribologia,* definiu-se, portanto, como *“A ciência e a tecnologia das superfícies interagindo em movimento relativo e as práticas relacionadas a elas”*.

Em sua exposição o autor alerta para as perdas financeiras advindas do não estudo dos desgates ocasionados por essa interação, que Jost afirma ter sido uma ciência negligenciada até aquele momento. Segundo o autor, a atenção insuficiente dada à tribologia resultou em “muitas centenas de milhões de libras perdidas” devido ao desgaste desnecessário, atrito, avarias e despedício de energia. O autor também cita que a ciência e a tecnologia dos materiais era a principal área de estudo que poderia remediar as perdas econômicas identificadas.

Jost apresentou o primeiro levantamento sobre os impactos econômicos dos desgastes, e foi um marco para essa nova ciência. Nesse relatório, a estimativa das perdas financeiras em decorrência dos desgastes na Inglaterra, no ano de 1966, correspondiam a 0,5% do produto nacional bruto. Anos depois, verificou-se que os valores apresentados no diagnóstico ainda estavam subestimados (SINATORA, 2005).

3.6.2 Princípios básicos de tribologia

De acordo com a norma DIN 50320, a definição de desgaste é "a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido a ação mecânica, i. e., o contato e o movimento relativo contra um corpo sólido, líquido ou gasoso". O desgaste é provocado pela desintegração dos componentes resultado do esforço excessivo do material na vizinhança imediata da superfície. O desgaste reduz a eficiência operacional dos equipamentos, resultando em alterações dimensionais ou danos à superfície. A propagação de trincas formadas na superfície ou sob tensão pode levar à fratura do componente (GAHR, 1987).

Existem vários tipos de desgaste que podem ser classificados, do ponto de vista dos tipos de interação de contato das superfícies, como adesão, abrasão, fadiga e corrosão, figura 21. Comumente, o desgaste não ocorre através de um único mecanismo, sendo necessário o entendimento de cada tipo. Em geral, a avaliação do desgaste é feita pela quantidade de volume perdido e pelo estado da superfície desgastada. (BHUSHAN, 2000).

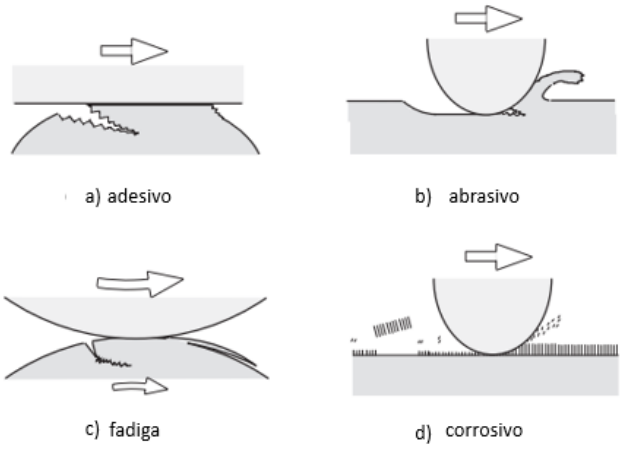


Figura 21. Representação dos quatro modos de desgaste (BHUSHAN, 2000).

Em a) o desgaste adesivo, no qual, tem-se a força da ligação adesiva das superfícies em oposição ao deslizamento. O deslocamento entre as superfícies resulta em uma deformação plástica que gera uma trinca no material. Esse defeito pode se propagar levando a remoção de material. No desgaste abrasivo, em b) tem-se a remoção de material da superfície. Essa remoção está relacionada ao formato e a dureza dos materiais em contato. A fadiga, c), é resultado do movimento repetitivo de contato entre as superfícies, movimentos cíclicos, por exemplo. E, no último caso, em d) o desgaste corrosivo relacionado às interações químicas e eletroquímicas, que formam produtos de reação na superfície que podem ser removidos.

Outra classificação de desgaste considera os grupos: por deslizamento de superfícies e por partículas duras. O desgaste por partículas duras pode ainda ser subdividido em abrasão, de dois ou três corpos, e erosão (CAMPOREZ, 2018).

3.6.2.1 O desgaste abrasivo

Denomina-se desgaste abrasivo, quando duas superfícies apresentam um intertravamento em contato inclinado ou curvo, promovendo uma perfuração consequente do deslizamento entre elas. Como resultado, um certo volume de material é removido e um sulco abrasivo é formado na superfície mais fraca. Quando o material de desgaste é dúctil, tem-se a remoção superficial pelo mecanismo de microcorte. Já nos materiais quebradiços, tem-se a propagação de trinca (BHUSHAN, 2000). O esquema pode ser visto na figura 22.

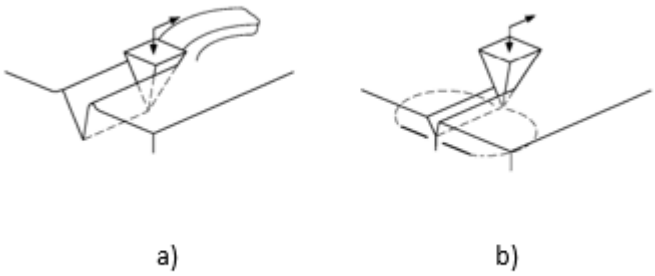


Figura 22. Representação de desgaste abrasivo em material dúctil a) e em material frágil em b) (BHUSHAN, 2000).

3.6.2.2 Desgaste erosivo

A definição do processo erosivo correlaciona a perda, de forma progressiva, do material originário de uma superfície sólida quando esta interage com um fluido - podendo este ser multicomponente – ou com partícula líquidas ou sólidas impactantes. Como resultado desse mecanismo, tem-se redução da espessura, ou afinamento da superfície atingida, aumento da sua rugosidade, podendo haver surgimento de um padrão ondulatório. (ASTM G76 – 18, 2013).

A extensão do desgaste depende de dois parâmetros: o número e da massa das partículas incidentes e sua velocidade de impacto. A degradação da superfície é ocasionada pela energia cinética que, transformada em energia de impacto, gera tensões na colisão das partículas com a superfície, resultado em remoção do material (OLIVEIRA, 2011).

Segundo Bayer (BAYER,1994) citado por Bhushan:

"Wear is not a material property. It is a system response".

"O desgaste não é uma propriedade do material. É uma resposta do sistema" – traduzido.

4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O ambiente da atividade mineradora submete os equipamentos a condições intensas de desgastes mecânicos é muito comum a incidência da abrasão nos equipamentos. A natureza das polpas de minério de ferro, com presença de material ferroso e silicoso, em meio úmido, juntamente com a velocidade de passagem da polpa pelas superfícies, favorece os processos de desgaste por abrasão e oxidação das máquinas. O dano causado por esses tipos de desgastes é um dos principais motivos para a diminuição da vida útil do maquinário (MASSOLA, 2015).

As mineradoras têm procurado, cada vez mais, soluções que reduzam os impactos da abrasividade nos equipamentos, e, consequentemente as perdas econômicas advindas dos processos de manutenção e substituição das peças desgastadas. Uma opção é a escolha de um revestimento antiabrasão que funciona como um material de sacrifício. O revestimento sofre os impactos da abrasividade do meio e a estrutura do equipamento é poupada. Após o uso, o revestimento pode ser substituído, mantendo a integridade do equipamento revestido (BRITZ, 2014).

Em artigo publicado na Revista de Minérios e Minerales, Britz apresenta alguns depoimentos de empresas que utilizam materiais de revestimento para reduzir o dano causado pelos processos de abrasão. Na unidade de Negócio Nióbio e Fosfatos da Anglo American, por exemplo, utiliza-se, segundo o gerente de Manutenção, poliuretanos em tubulações, polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) em calhas de separadores magnéticos e chapa dura em caixas de desgaste. Segundo ele, todas a tubulações da moagem, deslamagem e flotação estão sendo substituídas por canos com revestimento de poliuretano, que tem apresentado maior durabilidade.

A autora relata que, segundo o engenheiro de Materiais da Kinross Brasil Mineração, a mina Morro do Ouro, em Paracatu (MG) tem tubulações de transporte de polpa revestidas internamente em borracha natural, de dureza de 40 a 45 Shore A. Na área de britagem, utiliza-se, na mina, revestimentos em ligas de aço-carbono, temperada, com dureza em torno de 400 HB e espessura de 25,4 mm. Com utilização desse material, a mineradora conseguiu elevar a vida útil dos revestimentos do desviador em mais de 22 vezes comparado ao que se utilizava anteriormente.

A mina de Alegria, em Mariana (MG), utiliza chapas de desgaste no interior dos chutes de transferência, revestimentos de tambores de correias transportadoras, grelhas, caçambas, britadores, calhas de peneiras, revestimentos de moinhos e tubulações de polpa com poliuretano e borracha. Além disso, segundo Giffoni, gerente de Manutenção da Samarco, a mineradora realiza estudos para desenvolver aplicações de PEAD como revestimento em tubulações, que não se adequam à aplicação de poliuretano ou borracha (BRITZ, 2014).

Além da indústria mineradora, os revestimentos e peças de poliuretano encontram grande aplicação no setor de gás e petróleo, que utilizam dutos flexíveis para realizar a conexão entre poços de extração e as plataformas ou navios. Esses dutos além do transporte dos produtos de extração, conduzem água e demais fluidos de importância da cadeia do petróleo e, portanto, devem apresentar características de resistência que permita sua utilização nas condições de operação (RAMOS NETO et al., 2003).

Os separadores magnéticos, tanto da empresa Gaustec quanto de outros fabricantes, tem como peça necessária, a caixas de alimentação. Cada equipamento tem um número diferente de caixas por rotor, e como dito anteriormente, o tempo uso de cada caixa depende da natureza do material processado, do tipo de equipamento, das condições de operação, dentre outros aspectos.

Um levantamento foi feito junto à equipe de manutenção da empresa Gaustec, na Itaminas, mina localizada na cidade de Sarzedo, MG. Constatou-se que, entre novembro de 2014 a novembro de 2016, foram trocadas 108 caixas de alimentação dos separadores que operavam, na época, em 82 operações de manutenção para esse fim[2]. As caixas de alimentação retiradas se tornam descarte, uma vez que o desgaste apresentado pelas peças inviabiliza a utilização desse item para o processo de separação magnética. Na figura 23, tem-se o estado de degradação de algumas das caixas retiradas.

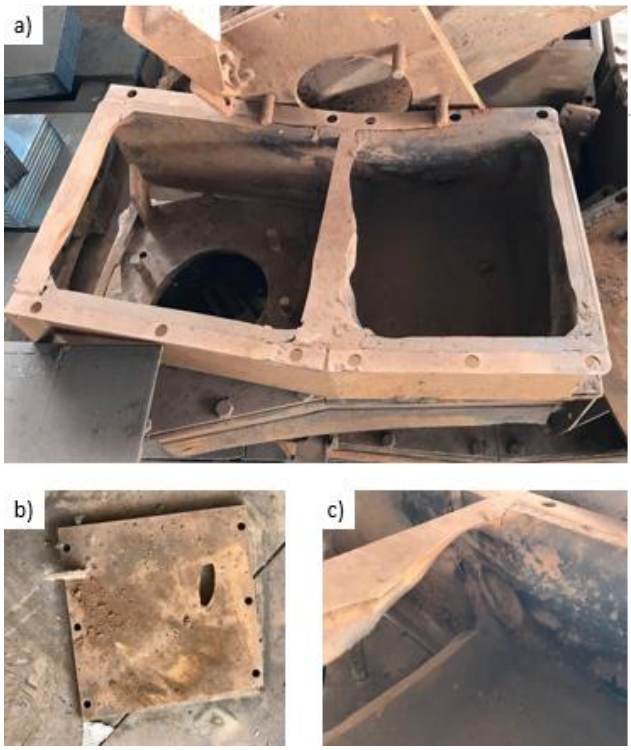


Figura 23. Caixas de alimentação retiradas de operação por desgaste do material (a) Caixa apresentado diversas deformações na parte estrutural em decorrência do desgaste. (b) Furo na tampa superior da caixa. (c) Furo lateral no interior da caixa.

[2] Informações constantes em relatório da empresa e disponibilizadas para fins de consulta para realização desta pesquisa.

Ao longo dos anos, muitos desses equipamentos, sem condições de uso, geraram uma grande quantidade de material descartado no pátio da empresa, como mostra a figura 24.

Figura 24. Acúmulo de caixas de alimentação descartadas após uso.

Alguns exemplares apresentam boa parte da estrutura metálica em condições de recuperação e uso, porém, pontos específicos de desgaste crítico inviabilizaram a continuidade da utilização.

5. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO PROPOSTO

O poliuretano elastomérico tem se mostrado como solução potencial para os impactos do desgaste de equipamentos na indústria mineradora. Dessa forma, o presente trabalho propõe sua aplicação como revestimento em caixas de alimentação de separadores magnéticos, em substituição ao revestimento de borracha anteriormente utilizado pela empresa Gaustec.

Variações da dureza dos revestimentos de poliuretano foram aplicadas às caixas e testadas em operação. O intuito foi avaliar, comparativamente, o desempenho dos revestimentos de borracha, PU 82 Shore A e PU 95 Shore A. O comportamento de cada um dos materiais em operação foi comparado às suas propriedades a fim de se estabelecer uma correlação entre eles.

Adicionalmente, mediante a problematização do acúmulo de caixas de alimentação descartadas após o uso nos separadores magnéticos, sugeriu-se reformar a parte estrutural desses equipamentos, inserindo um novo revestimento polimérico nas caixas. Realizou-se, dessa forma, avaliação do potencial de uso das caixas reformadas como solução para o volume descartado.

6. METODOLOGIA

Para levantamento das propriedades dos revestimentos de poliuretano foram realizadas caracterizações físico química e mecânica dos elastômeros obtidos comercialmente.

6.1 Materiais

Para a realização dos trabalhos foram usados dois tipos de poliuretanos obtidos comercialmente cujos percentuais de NCO informados na embalagem dos produtos e no certificado de qualidade do fabricante, estão mostrados na Tabela 1. Os polímeros foram preparados pelo método de síntese em duas etapas, sendo a primeira etapa previamente preparada pelo fornecedor. A etapa de extensão de cadeia, segunda etapa, foi realizada nos moldes apropriados. Foram acrescentados pigmentos aos pré-polímeros, em cores diferentes, com o intuito de facilitar o processo de identificação das caixas nos equipamentos de separação, como detalhado na Tabela 1.

Tabela 1. Composição do revestimento de poliuretano das caixas reformadas

Material	Base de formulação	Poliol	Agente de cura	%NCO	Pigmento
PP95	TDI	Poliéter	4,4'-metileno-bis(2-cloroanilina)	6,55	Vermelho
PP82	TDI	Poliéter	4,4'-metileno-bis(2-cloroanilina)	3,24	Laranja

Confeccionou-se corpos de prova do mesmo material para realização do ensaio de dureza dos materiais. Os elementos na parte superior da imagem, na cor laranja, das caixas de material PP82, e os vermelhos na parte inferior da imagem, confeccionados a partir do material PP95:

Figura 25. Fotografia dos corpos de prova, nas cores laranja (superior) e vermelho (inferior) para ensaio de dureza

6.1.1 Ensaio mecânico

A medição de dureza dos revestimentos das caixas reformadas foi realizada com durômetro analógico da marca DIGIMESS® e de acordo com a Norma ASTM D 2240. Os ensaios foram feitos em quintuplicada de cada uma das amostras.

6.1.2 Caracterização Estrutural

A estrutura química do polímero foi avaliada utilizando um espectrômetro infravermelho da marca Shimadzu modelo IR prestigie 21 acoplado com ATR (reflectância total atenuada). Os espectros foram obtidos com 60 *scans* na faixa de número de onda entre 4000 a 400 cm^{-1}. As atribuições das bandas foram realizadas em comparação aos valores do número de onda característicos para os grupos existentes na estrutura química de acordo com a literatura.

6.2 Aplicação do revestimento de poliuretano nas caixas de alimentação

Os revestimentos poliméricos, a base de poliuretano de dureza 82 (PP82) e 95 (PP95) Shore A, foram aplicados segundo processo industrial realizado pela empresa Gaustec. Foram utilizados pré-polímeros e agente de cura comerciais. As fotografias das caixas revestidas seguem nas Figuras 26 e 27.

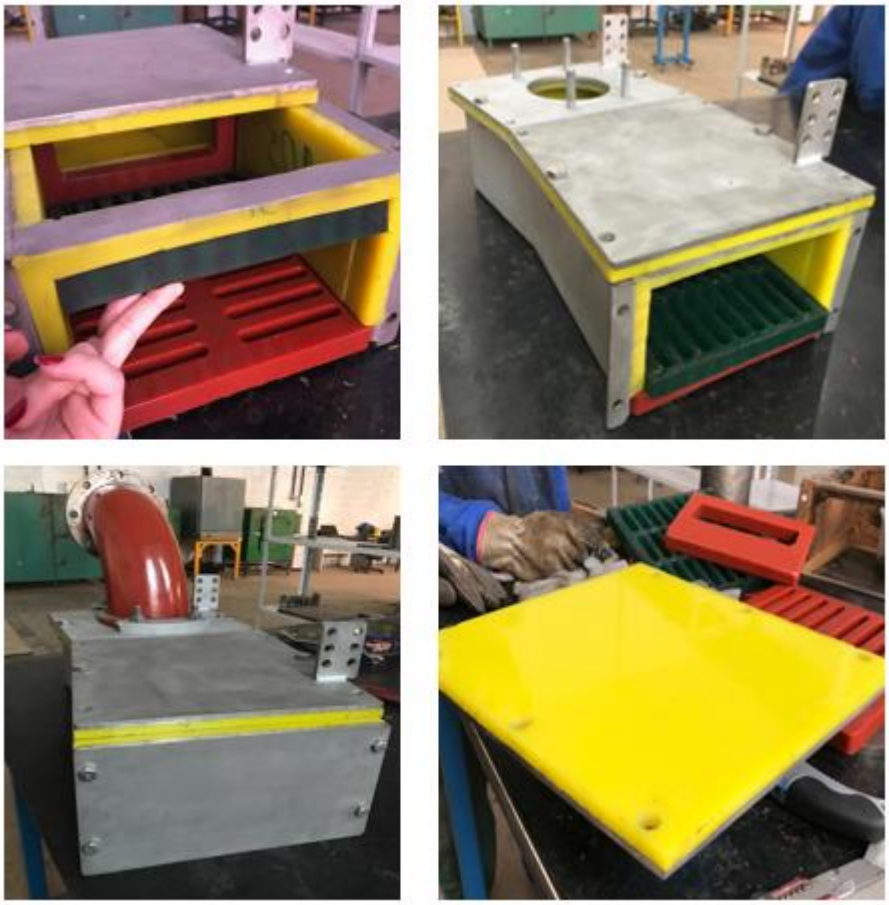


Figura 26.Fotografias dos revestimentos de poliuretano em caixas de alimentação.

Figura 27. Fotografias das caixas de alimentação da empresa Gaustec com revestimento de poliuretano.

Os equipamentos foram enviados para a mineradora Itaminas para serem avaliados durante as manutenções preventivas e corretivas realizadas pela equipe de Engenharia de Aplicação da Gaustec. Relatórios de desgaste com imagens das caixas de PU foram gerados para a averiguação do desempenho dos revestimentos.

6.3 Reforma das caixas de alimentação e aplicação de revestimento

Caixas de borracha descartadas (Figura 28) pela mineradora Itaminas foram coletadas e avaliadas quanto ao potencial de recuperação. Nove exemplares tiveram seu revestimento de borracha desgastado removido e a parte estrutural reformada, de maneira que a estrutura metálica de aço inox ficasse adequada para receber um novo revestimento.

Figura 28. Fotografia das caixas desgastadas selecionadas para recuperação.

Os revestimentos de poliuretano de dureza 82 e 95 Shore A foram aplicados em seis caixas, três para cada revestimento, segundo processo industrial realizado pela empresa NEW GAPS®. Demais componentes da caixa, como grades internas foram confeccionados do mesmo material e cor do revestimento. Três caixas reformadas foram encaminhadas para empresa terceirizada para aplicação de revestimento de borracha natural, conforme Figura 29. Os dados de propriedades físico químicas e mecânicas da borracha foram informados no certificado de qualidade emitido pela empresa.

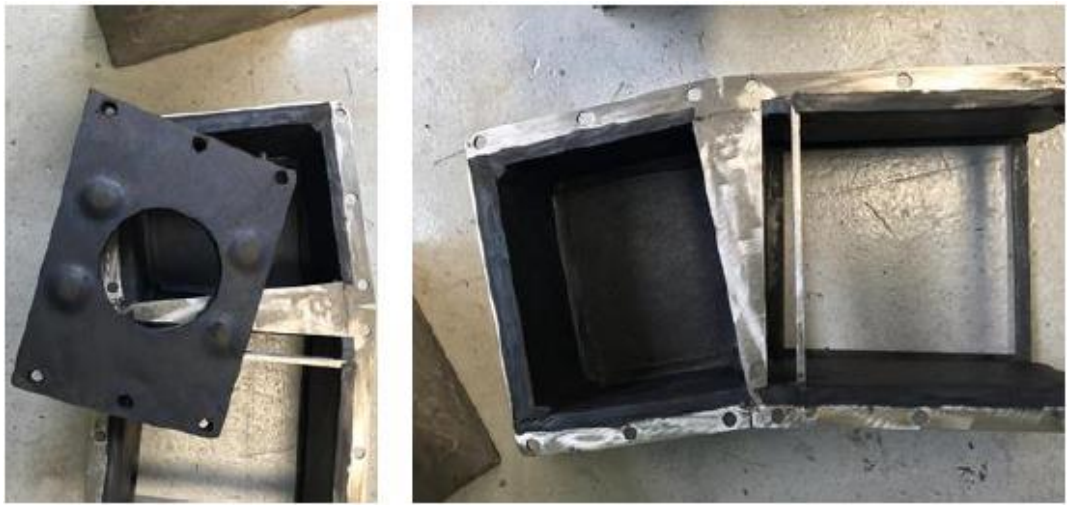


Figura 29. Fotografia da caixa de alimentação revestida de borracha.

6.4 Alocação das caixas para avaliação do potencial de recuperação

As nove caixas reformadas foram encaminhadas para a mineradora Itaminas para avaliação do desempenho dos revestimentos e o potencial de uso das caixas reformadas como alternativa para os equipamentos descartados. O esquema mostrado na Figura 30, apresenta os pontos de alocação diferenciando o separador magnético, a etapa de processamento e a posição – rotor inferior ou superior:

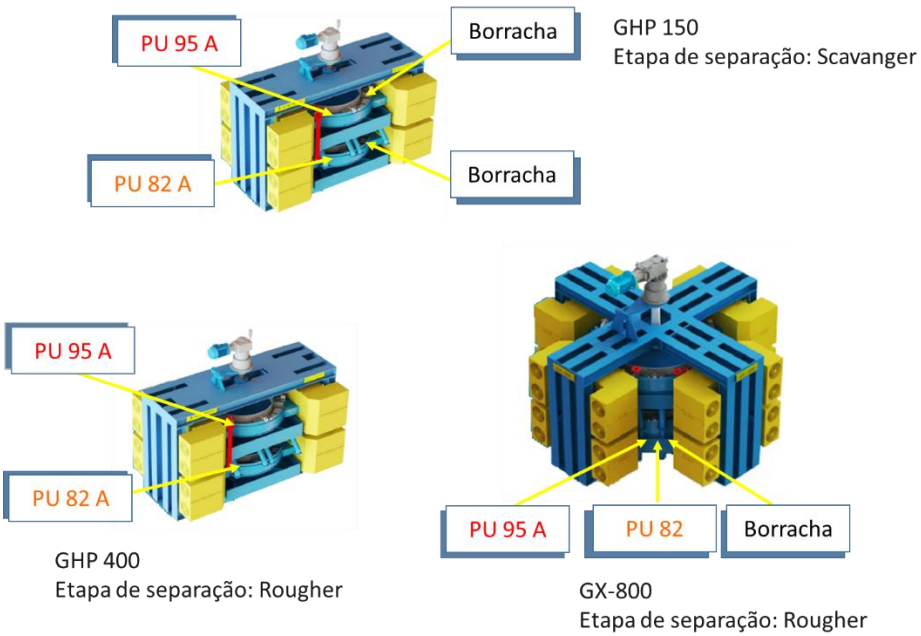


Figura 30. Esquema de alocação das caixas de alimentação nos separadores magnéticos.

A evolução dos desgastes das caixas foi avaliada visualmente, a partir de relatório fotográfico. As inspeções foram realizadas durante as manutenções e de

acordo com o calendário e disponibilidade da equipe da Gaustec. As caixas permaneceram em operação pelo tempo de vida útil que cada uma delas apresentar ou até 18 de agosto de 2020, data em que as avaliações foram cessadas.

7. RESULTADOS

7.1 Propriedades físico químicas e mecânicas dos revestimentos de poliuretano das caixas reformadas

Os valores obtidos para a medição (Med_i) de dureza dos revestimentos das caixas reformadas, em quintuplicada, de cada uma das amostras (A_i), constam na Tabela 2:

Tabela 2. Valores das medições de dureza dos revestimentos de poliuretano

Amostra	Material	%NCO*	Dureza média Shore A	Med 1	Med 2	Med 3	Med 4	Med 5
A1				90	90	90	90	90
A2	PP95	6,55	91 ± 2	90	91	90	90	90
A3				93	93	92	94	93
A4				86	86	87	87	86
A5	PP82	3,24	84 ± 3	87	87	85	87	86
A6				81	80	81	80	80

A Tabela 3 sintetiza o tipo revestimento aplicado, a dureza do revestimento e a quantidade de caixas, bem com a indicação de coloração utilizada para distinguir as caixas nos separadores magnéticos.

Tabela 3. Resumo dos revestimentos das caixas reformadas

Quantidade de caixas	Tipo de revestimento	Dureza	Cor
3	Borracha	40 ± 5 Shore A	Preta
3	PU	91 ± 2 Shore A	Vermelho
3	PU	84 ± 3 Shore A	Laranja

Em relação a densidade, dureza, alongamento e resistência à abrasão, de cada um dos revestimentos, os dados comparativos estão mostrados na Tabela 4, de acordo com as informações fornecidas pelos fabricantes, nas fichas técnicas dos produtos.

Tabela 4. Propriedades dos revestimentos das caixas reformadas.

Revestimento	Densidade relativa a 25° C (g/cm³)	Dureza[1] (Shore A)	Alongamento[2] (%)	Resistência[3] a abrasão (mm)
PU 95	1,07	95 ± 5	> 350	< 30
PU 82	1,04	82 ± 5	> 500	< 30
Borracha	1,06	40 ± 5	850	150

[1] Norma ASTM D 2240

[2] Norma ASTM D 412

[3] Norma DIN ISO 4649

Os dados obtidos nas medições de dureza, encontram-se dentro dos valores apresentados nas fichas dos produtos. De acordo com os dados de resistência à abrasão, Tabela 4, os revestimentos de poliuretano devem apresentar melhor desempenho, com menores perdas de espessura, comparados a borracha. Entre os revestimentos de PU, a eficiência dos materiais com diferentes durezas deverá ser avaliada em operação, uma vez que a ficha técnica apresenta os mesmos valores para ambos os materiais.

Considerando as referências de densidade, essa propriedade apresenta-se muito semelhante nos três materiais, não sendo, portanto, decisivo para a distinção do desempenho em operação das amostras. Os dados de deformação apresentados nas fichas não fornecem informações suficientes para proposições de desempenho dos materiais visto que, para os PU's, os valores se enquadram na mesma faixa do informado para a borracha.

7.2 Espectroscopia de absorção na região do infravermelho (FTIR)

A espectroscopia de absorção na região do infravermelho foi utilizado para investigar a diferença de estrutura química entre os revestimentos de poliuretano das caixas reformadas de diferentes durezas. A Figura 31 mostra os espectros de FTIR para o PU 95 Shore A e 82 Shore A. Observa-se que as duas amostras apresentam o mesmo grupo de bandas, já que se tratam do mesmo polímero, mas foi possível observar modificações nas relações de suas intensidades. As principais bandas que caracterizam os poliuretanos são referentes aos estiramentos de vibração da ligação N-H que aparecem aproximadamente 3250 cm^{-1}, as deformações de N-H observadas principalmente em 1518 e 810 cm^{-1} além das bandas referentes as vibrações de carbonila em ~ 1750 cm^{-1}, conforme mostrado na Tabela 5, Palma (2017) e Alves (2016).

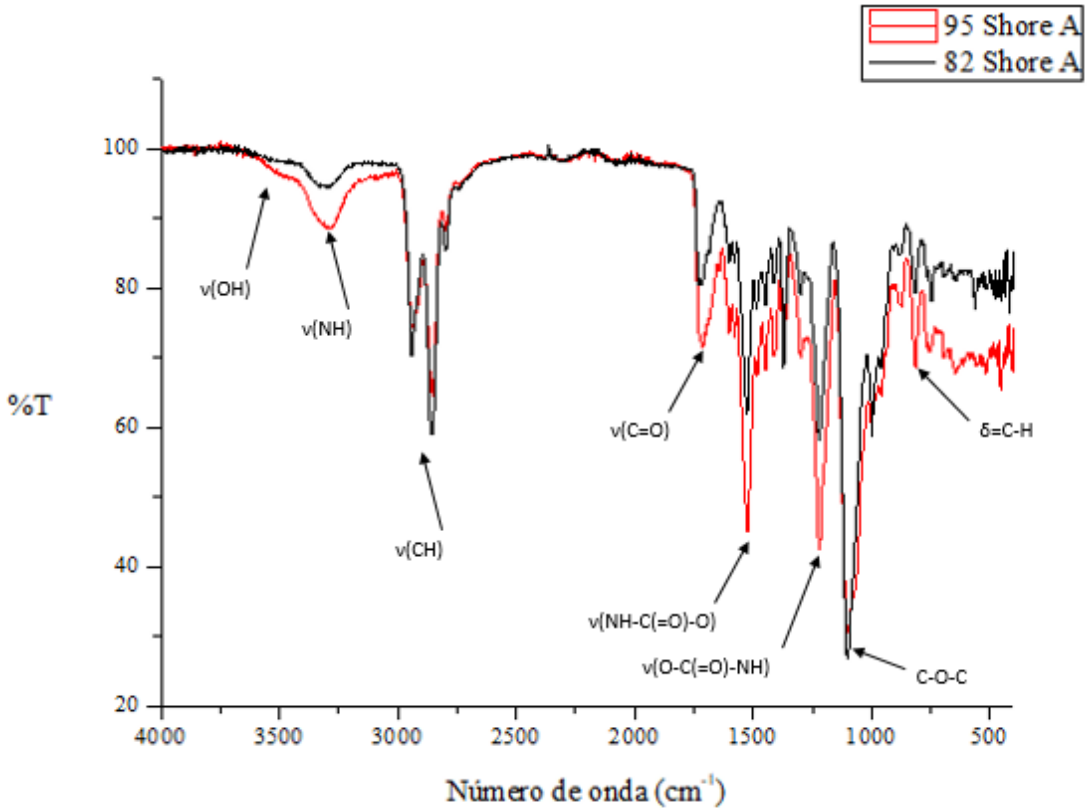


Figura 31. Espectro para o poliuretano 95 e 82 Shore A.

As intensidades relativas das bandas referentes às vibrações de estiramento e de deformações das ligações N-H e estiramento da carbonila são mais intensas no caso da amostra de dureza 95 Shore A. Isso ocorre devido ao maior teor de NCO livre nessa amostra, aproximadamente duas vezes maior. Embora os reagentes usados para a síntese sejam iguais a proporção entre diisocianatos e poliois é diferente, promovendo a formação de estruturas químicas também diferentes. Apesar do excesso de grupos NCO no meio reacional, pode-se verificar que todos, ou praticamente todos esses grupos foram convertidos em uretanos ligados, presentes na estrutura do tipo biureto e alofanato, confirmados pela ausência de bandas fortes e intensas próximas à 2300 cm^{-1}, característica de vibrações de átomos de carbono envolvido em duas ligações duplas, como mostrado nas estruturas da Figura 6 (página 13), ou em ligações triplas. A maior quantidade de grupos uretanas na estrutura do PU 95 é responsável pelo aumento relativo na intensidade das bandas associadas às vibrações dos grupos N-H e C=O no espectro de absorção na região do infravermelho e também pela diferença na propriedade de dureza relacionada com o maior número de interações cruzadas.

Tabela 5. Principais bandas identificadas no espectro de FTIR para amostra de poliuretano.

Número de onda (cm^{-1})	**Associação**
3250	3300-3200 cm^{-1} (estiramento NH)
2949, 2849	3000-2800- cm^{-1} (estiramento CH)
1715	1760-1600 cm^{-1} (amida I: estiramento C=O)
1518	amida II: δN-H + ν C-N + ν C-C)
1221	amida III: ν O-C(=O)-NH)
1098	estiramento C-O-C do éter
810	amida IV: δN-H

7.3 Acompanhamento do desgaste das caixas novas com revestimento de poliuretano

Analisando o desempenho das caixas de alimentação novas que foram colocadas em operação na Itaminas no dia 28/11/2017, duas com revestimento de poliuretano dureza 95 Shore A foram instaladas no separador magnético GHP 150 e as manutenções subsequentes avaliaram a evolução do desgaste conforme imagem mostrada nas Figura 32.

Figura 32. Fotografia da Caixa do rotor superior com 20 dias de operação.

O perfil de desgaste da caixa com revestimento de poliuretano 95 Shore A apresentou-se muito semelhante ao ocorrido com o revestimento de borracha. O ponto

de maior desgaste, como visto na Figura 33 é o mesmo observado nos equipamentos revestidos de borracha.

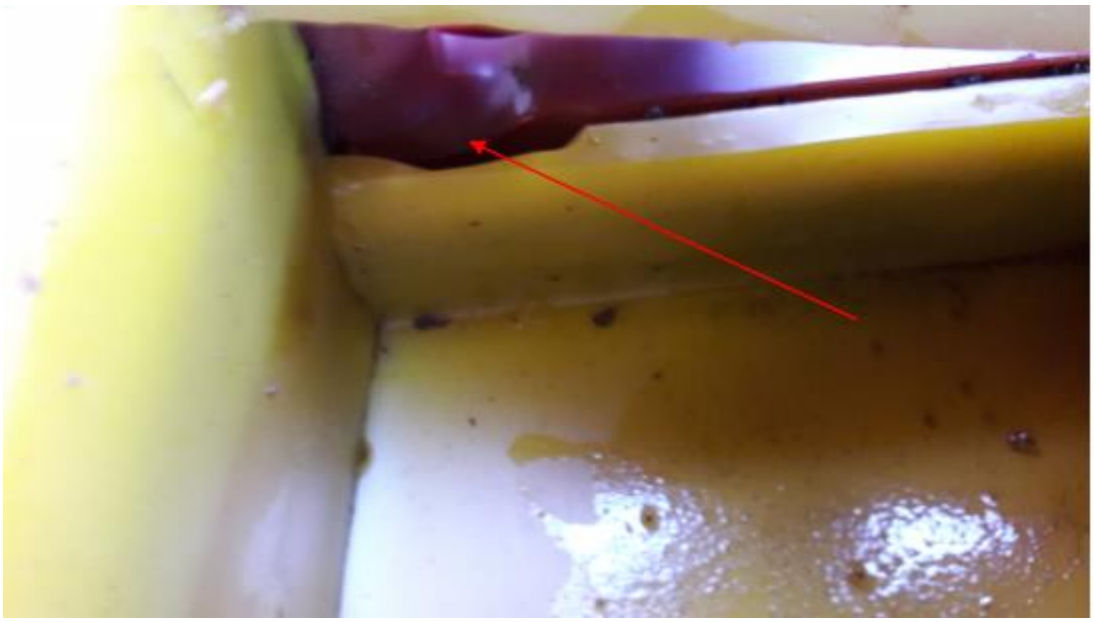


Figura 33. Fotografia mostrando o ponto de maior desgaste da caixa instalada no rotor inferior.

Após 39 dias de operação, nova manutenção foi realizada. O avanço do desgaste pode ser visto na Figura 34.

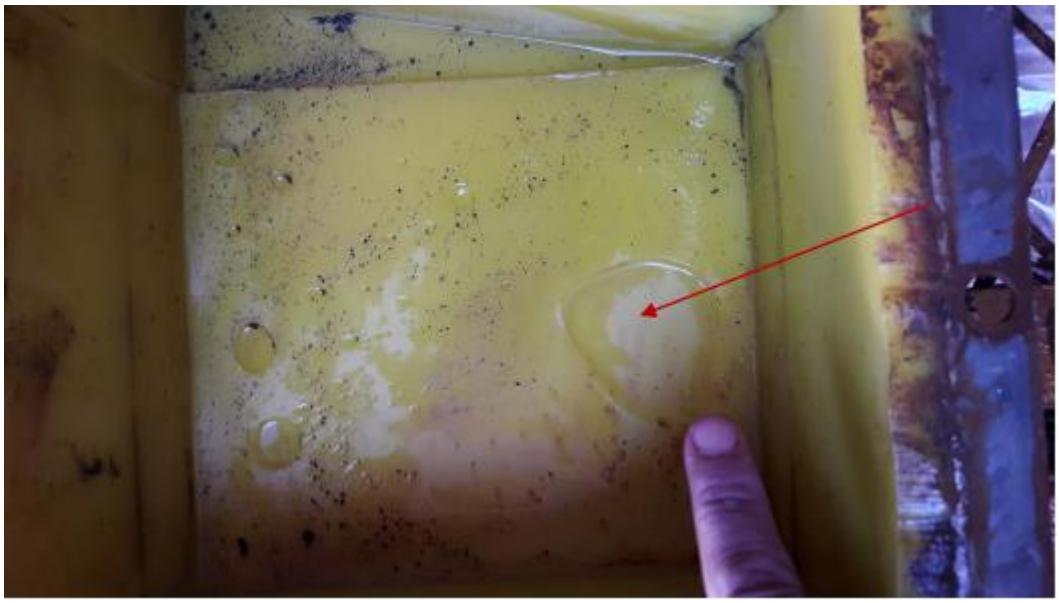


Figura 34. Fotogtafia mostrando o desgaste aparente no fundo da caixa.

Tanto a grade de controle de vazão (em vermelho) quanto o revestimento (em amarelo), ambos de dureza 95 Shore A, apresentaram desgaste acentuado na região de constrição do fluxo da polpa no interior da caixa, como mostra a Figura 35.

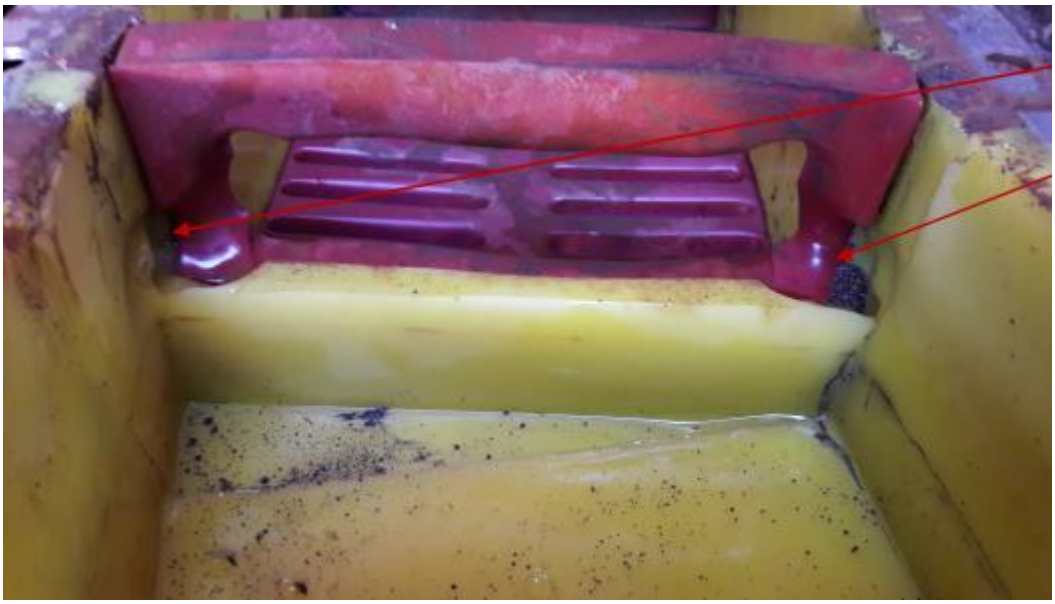


Figura 35. Desgaste lateral acentuado na grade de controle de vazão e no revestimento da caixa de alimentação do rotor inferior.

O ponto indicado pelas setas é o local mais recorrente de furo nas caixas alocadas no rotor inferior do separador GHP 150, em decorrência do desgaste do material.

Comparativamente, decorridos 39 dias, a caixa do rotor superior do mesmo separador magnético apresentou desgaste muito menos expressivo que a anterior, como ilustrado na Figura 36.

Figura 36. Caixa do rotor superior do GHP 150 com 39 dias de operação.

Da mesma forma, o ponto de desgaste lateral é o local de maior perda de espessura por desgaste abrasivo (Figura 37).

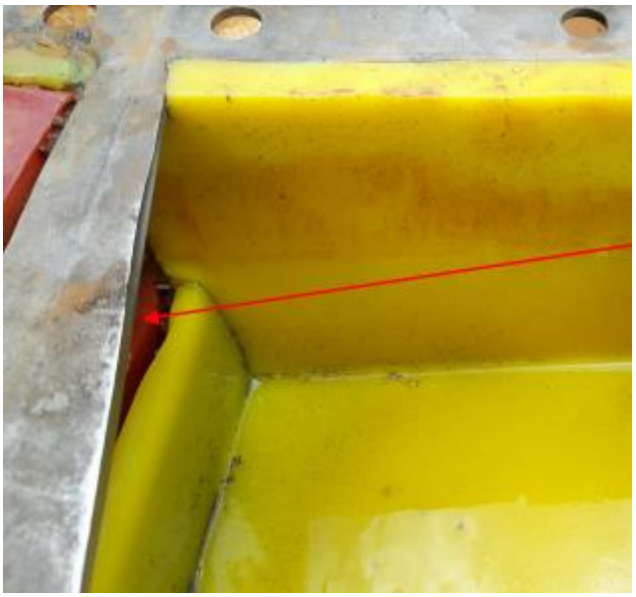


Figura 37. Fotografia mostrando o ponto de desgaste mais acentuado na caixa do rotor superior do GHP 150.

A caixa que operou no rotor inferior do GHP-150, apresentou vida útil de 58 dias, sendo retirada em 25/01/2018. No rotor superior o revestimento das caixas em teste apresentou menor desgaste, tendo tempo de vida útil de 126 dias, saindo de operação em 03/04/2018.

As caixas do GHP 150 foram substituídas por equipamentos com revestimento de dureza 82 Shore A e as grades internas foram mantidas com revestimento 95 Shore A. Da mesma forma que as anteriores, tiveram seu processo de desgaste acompanhado durante as manutenções realizadas. O registro fotográfico de 15/03/2018 mostra o desgaste da caixa 04, do rotor inferior do GHP 150, com 49 dias de operação está apresentado na Figura 38.

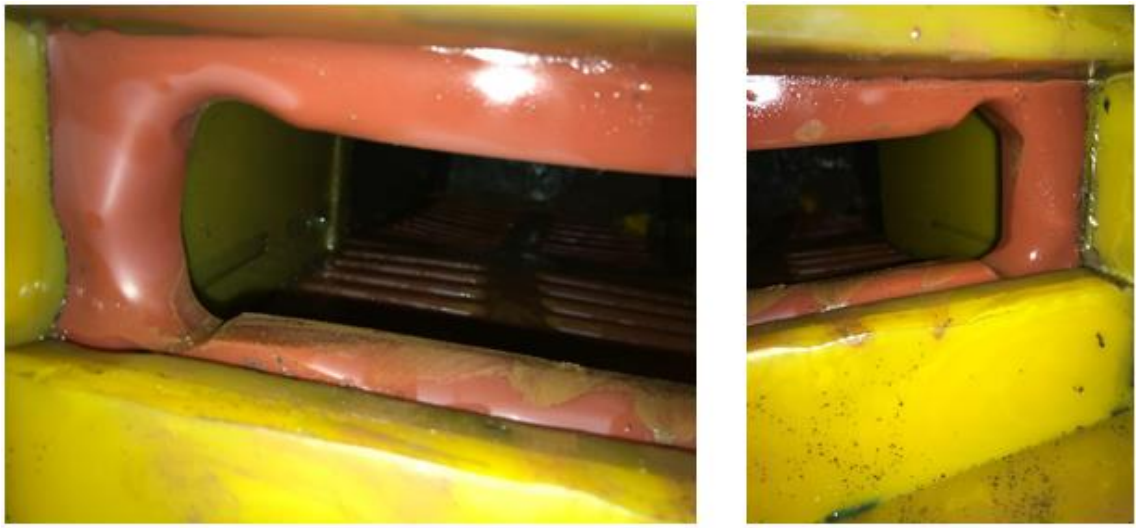


Figura 38. Acompanhamento da caixa 04 do rotor inferior do GHP 150 com 49 dias de operação.

Esse revestimento apresenta desgaste muito inferior ao visualizado com 39 dias do revestimento de dureza 95 Shore A. Comparativamente, pode-se observar a diferença entre o revestimento amarelo de dureza 82 A e a grade de controle de vazão de dureza 95 A, ambos operando nas mesmas condições por um mesmo período de tempo. A caixa operou até o dia 19/04/2019, totalizando 281 dias.

Para a instalação das caixas reformadas no GHP 400, no dia 17/01/2019, os equipamentos que estavam nesse separador, de dureza 82 Shore A, foram retirados. A fotografia da caixa 03 que estavam em operação desde 12/04/2018 está mostrada na Figura 39.

Figura 39. Caixa 03 do separador GHP 400 substituída por caixa reformada.

Observa-se que, com 280 dias em operação, o desgaste apresentado por esse componente foi muito baixo. Não foram detectados pontos críticos de redução de espessura tanto no revestimento quanto nas grades internas da caixa.

7.4 Reforma das caixas para aplicação de revestimento de poliuretano

As caixas selecionadas dentre as descartadas foram reformadas, furos nas laterais, partes superiores e inferiores das caixas foram soldados. Elementos estruturais do interior da caixa que não puderam ser recuperados foram substituídos. As Figuras 40 e 41 mostram parte do processo de recuperação da parte estrutural das caixas.

Figura 40. Processo de recuperação das caixas de alimentação desgastadas.

Figura 41. Pontos de desgaste dos elementos estruturais do interior da caixa.

Os revestimentos de poliuretano foram aplicados nas caixas reformadas como mostra a Figura 42:

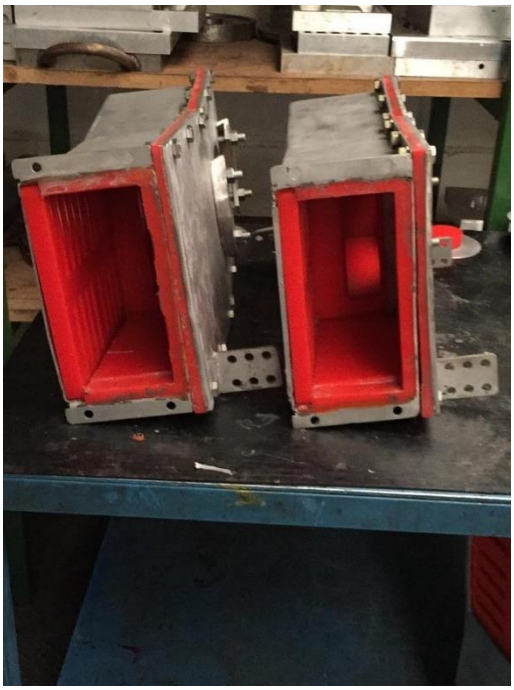


Figura 42. Caixas de alimentação reformadas com revestimento de poliuretano.

Os separadores GX 3600 e GHP 150, que compões as linhas A/B, receberam as caixas no dia 02/01/2019. No separador GHP 400, linha C, as caixas foram instaladas em 17/01/2019, como mostra a Figura 43.

Figura 43. Caixas com revestimento de poliuretano dureza 95 Shore A sendo colocadas no separador magnético GHP 400.

As operações na Itaminas foram suspensas entre 09/02/2019 e 22/01/2020 em decorrência do pacote de medidas de segurança da Agência Nacional de Mineração, por razão do rompimento da barragem do Córrego do Feijão, em Brumadinho. Durante esse período, as caixas revestidas investigadas ficaram alocadas nos separados magnéticos nas condições em que a operação foi interrompida. Com a liberação e o retorno da operação da planta de concentração magnética, foi possível dar continuidade aos testes relacionados à análise de desgaste dos revestimentos das caixas. Tais análises foram feitas de forma comparativa, entre os tipos de revestimento, levando em consideração o tempo de operação de cada um, somando-se o tempo antes da parada aos dias posteriores à retomada.

O acompanhamento da evolução do desgaste foi feito durante as manutenções preventivas das linhas A/B e C e reportada a retirada ou continuidade de uma caixa de acordo com sua condição operacional. As caixas que apresentaram desgaste acentuado do revestimento, furação na estrutura com decorrente extravasamento de material ou comprometimento da estrutura interna foram retiradas, cessando a contagem do tempo de vida últil. A avaliação e definição da continuidade dos equipamentos nos separadores magnéticos foi feita pela equipe de manutenção da Itaminas, não sendo de interesse do presente trabalho interferir no procedimento padrão da mineradora neste processo.

Em relação ao separador GHP-400, no dia 13/03/2020, foi realizada manutenção na linha C, sendo verificada a condição das caixas alocadas nesse equipamento. Tanto a caixa-02, revestida de PU 95 A, quanto a caixa-03, com revestimento de PU 82 A, em operação por 74 dias, não apresentavam desgaste relevante, como mostram os registros fotográficos das Figuras 44 e 45.

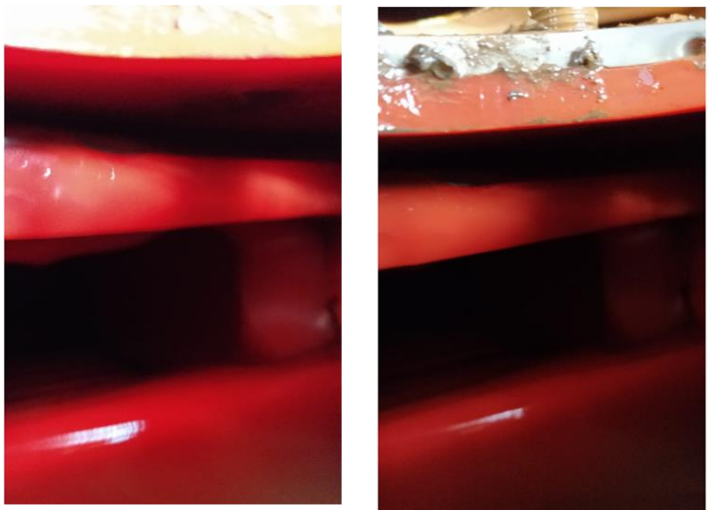


Figura 44. Registro fotográfico do revestimento da caixa-02 na região da grade de controle de vazão da caixa.

Figura 45. Registro do desgaste apresentado pela CX-03 – GHP 400

Em posterior inspeção ao mesmo separador, GHP-400, em 31/03/2020, ambas as caixas, em operação por 92 dias, apresentavam início de desgaste perceptível nas laterais próximo à grade de controle de vazão, de ambos os lados da caixa, conforme Figura 46 e 47.

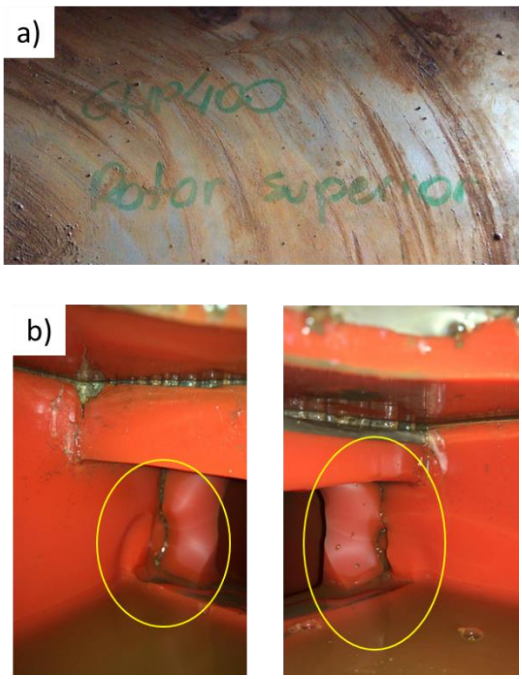


Figura 46. a) Caixa do rotor superior GHP 400. b) Início do desgaste lateral do revestimento no local da grade de controle de vazão.

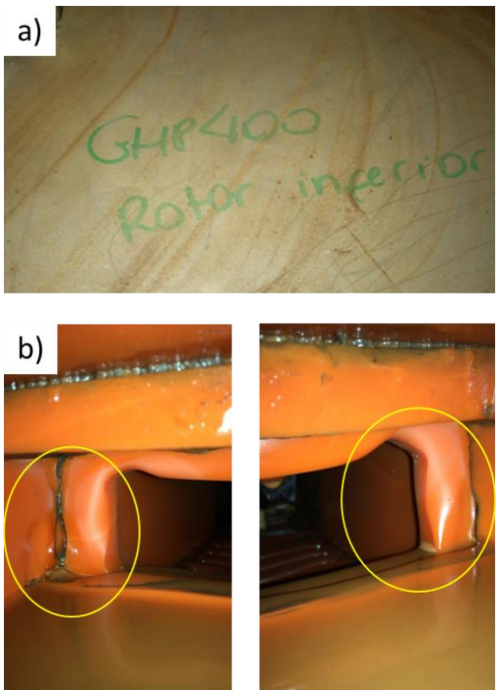


Figura 47. a) Caixa-03 do rotor inferior GHP 400. b) Início do desgaste lateral do revestimento no local da grade de controle de vazão.

A caixa 02 do rotor superior do GHP-400, revestida de PU 95 A foi retirada do separador em 24/06/2020, operando por 177 dias. Apresentou perda de material metálico da estrutura de sustentação da grade de controle de vazão, desgaste localizado e expressivo no local dessa grade e furação, conforme registros fotográficos mostrados nas Figuras 48 e 49.

Figura 48. a) Identificação da caixa do rotor superior do separador GHP 400. b) Desgaste na estrutura de sustentação da grade de controle de vazão. c) Desgaste lateral com presença de furo na estrutura da caixa.

Em manutenção no dia 15/07/2020, foi verificado desgaste expressivo da grade de controle de vazão da caixa 03, do rotor inferior do separador GHP-400, com revestimento de PU 82 A, após 198 dias. O revestimento da caixa, no entanto, apresentava condições de operação e, portanto, houve a substituição da grade, permanecendo a caixa em operação.

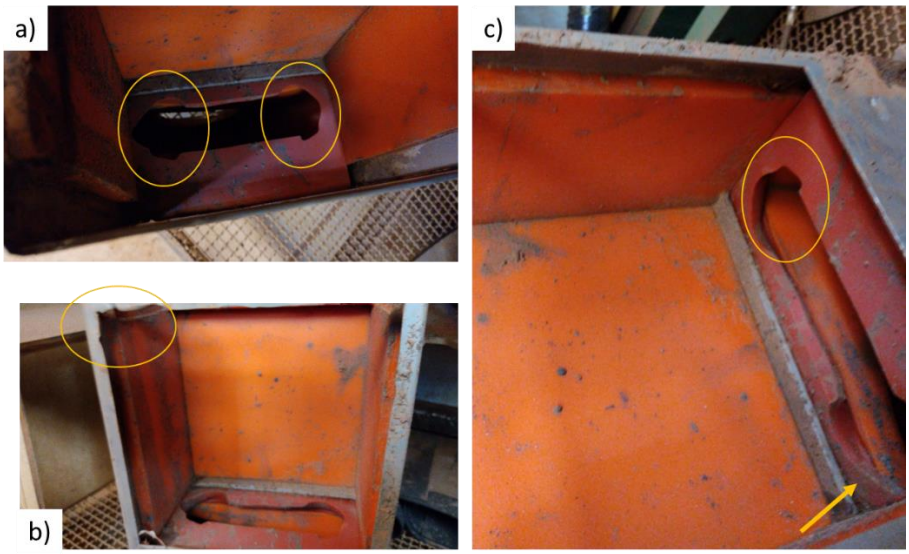


Figura 49. a) Desgaste expressivo da grade de controle de vazão com alteração do formato da grade e aumento da abertura do componente. b) Pequeno degaste na estrutura metálica posterior da caixa. c) Desgaste da grade de controle de vazão com deformação estrutural do elemento.

Durante o tempo de análise considerado neste projeto, a Caixa-03 continuou em operação não sendo possível avaliar seu desgaste posterior à utilização. Dessa forma, no GHP 400, o revestimento de PU de dureza 82 shore A apresentou melhor desempenho que o revestimento de PU 95 A.

Em relação às caixas do separador GX 800, em 01/04/2020, verificou-se a condição de operação das caixas 05, 07 e 08, todas alocadas no rotor inferior, recebendo o mesmo material para processamento e tendo a mesma diferença de altura em relação ao ponto de alimentação e alocação das caixas. As caixas 05 e 08, ambas revestida de PU, de dureza 95 A e 82 A, respectivamente e a caixa 07, revestida de borracha, estavam em operação há 108 dias. As duas primeiras apresentavam início de desgaste leve nas laterais próximo à grade de controle de vazão, de ambos os lados da caixa, conforme Figura 50.

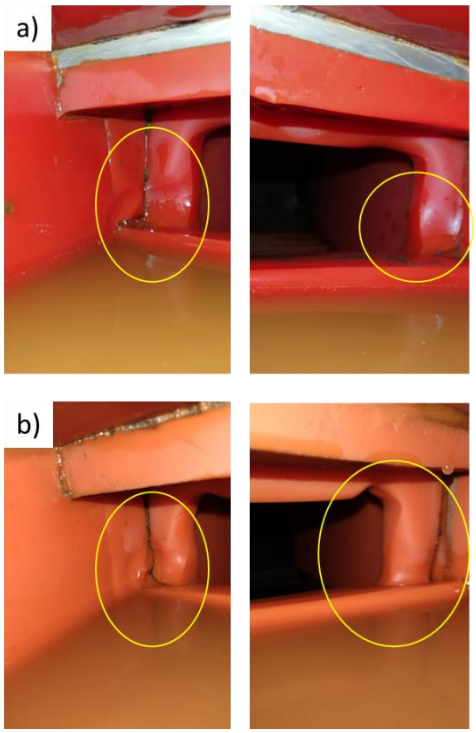


Figura 50. a) Desgaste apresentado pela CX-05 revestida de PU 95 A. b) Desgaste apresentado pela CX-05 revestida de PU 82 A.

A Caixa-07, revestida de borracha (Figura 51), foi retirada de operação uma vez que seu revestimento apresentava desgaste com exposição da estrutura metálica e furo nas laterais. O desgaste provocou perda estrutural do suporte que sustenta a grade de controle de vazão impossibilitando o prosseguimento desse equipamento de forma operacional.

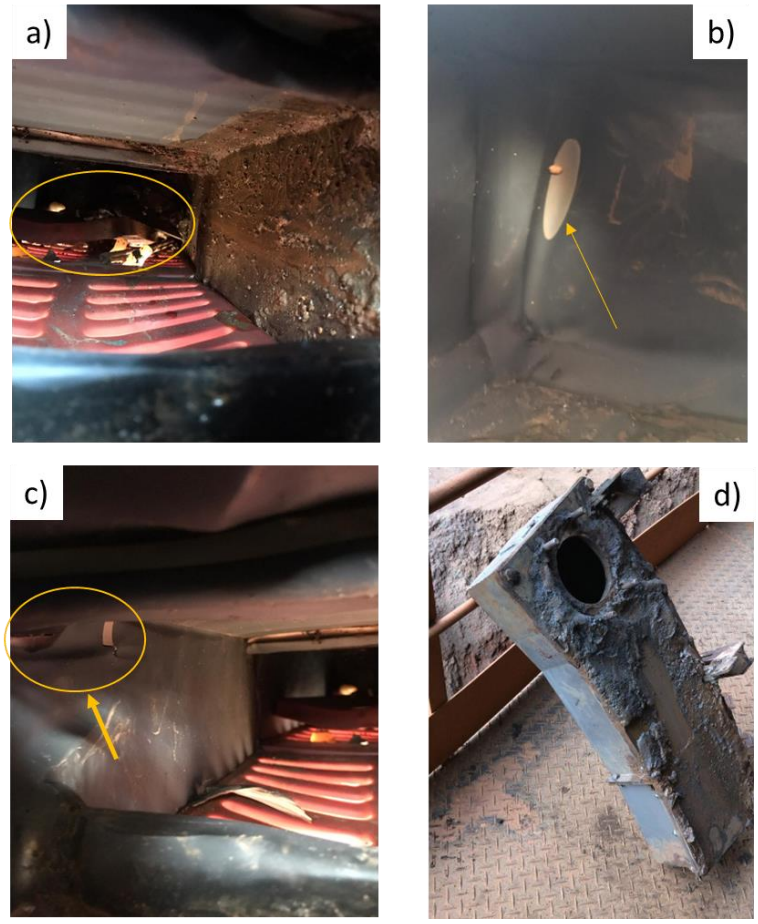


Figura 51. a) Desgaste e perda da estrutura de sustentação com deslocamento da grade de controle da vazão. b) Remoção de parte do revestimento com exposição da estrutura metálica. c) Presença de furos laterais na estrutura da caixa. d) Caixa 07 retirada de operação.

Durante inspeção posterior, realizada em 25/06/2020, a Caixa 08, revestida de PU 82 A, do rotor inferior foi retirada de operação apresentando 193 dias de vida útil. Pela Figura 52, percebe-se que houve desgaste da grade de controle de vazão, mas o revestimento ainda estava em condições operacionais, porém, a caixa apresentou perfuração da estrutura na parte inferior.

Figura 52. a) Caixa revestida de PU 82 A retirada de operação. b) Desgaste da grade de controle de vazão e lateral do revestimento. c) Revestimento apresentava baixo desgaste. d) Furo na parte inferior da caixa permitindo extravasamento de material.

A caixa com revestimento de poliuretano de dureza 82 A apresentou rendimento operacional superior àquela com revestimento de borracha em 85 dias, estando ambas alocadas no mesmo rotor. No separador GX 800, a caixa com revestimento de PU 95 A apresentou maior tempo de vida útil quando comparada aos outros dois elastômeros. No entanto, considerando o desempenho do revestimento, não se pode estabelecer um apontamento de superioridade entre os dois poliuretanos.

Em relação ao desempenho das caixas com revestimento de borracha do GX-150, alocadas nos rotores superior e inferior, o tempo de operação foi de 123 e 107 dias, respectivamente. O revestimento lateral da caixa do rotor inferior foi praticamente todo desgastado, apresentando corte na borracha e início de desgaste da estrutura metálica, Figura 55. Tendo permanecido menos dias em operação, o desgaste na caixa do rotor inferior foi muito mais pronunciado, comparando-se à caixa do rotor superior, Figura 54. Dessa forma, a evolução do desgaste pode ser associada à diferença de altura do ponto de alimentação do material recebido, explicitado pela na Figura 53.

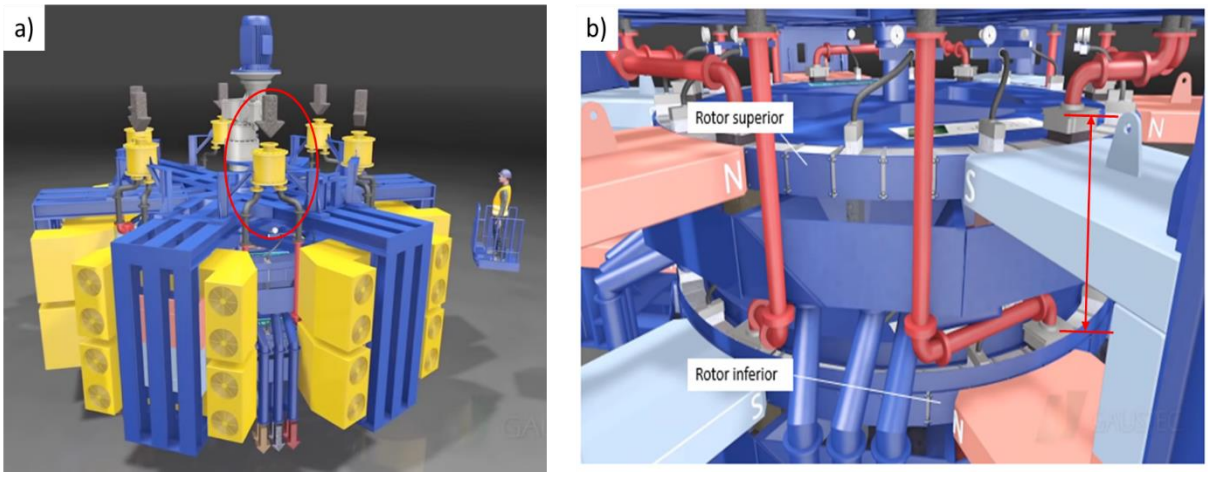


Figura 53. a) Ponto de alimentação do separador magnético. b) Diferença de altura entre o ponto de recebimento das caixas do rotor inferior e superior.

Caixas que recebem alimentação de um mesmo distribuidor, com a mesma vazão, Figura 53 (a) estão separadas pela distância dos rotores Figura 53 (b). No ponto de chegada da alimentação na caixa do rotor inferior, a massa de polpa é acelerada pela ação da gravidade por um deslocamento igual à diferença de altura dos rotores. Comparativamente, no rotor superior, a altura da tubulação que liga o distribuidor à caixa de alimentação é menor, estando o fluxo de polpa exposto a uma menor aceleração e, por conseguinte, menor velocidade de deslocamento no interior da caixa de alimentação.

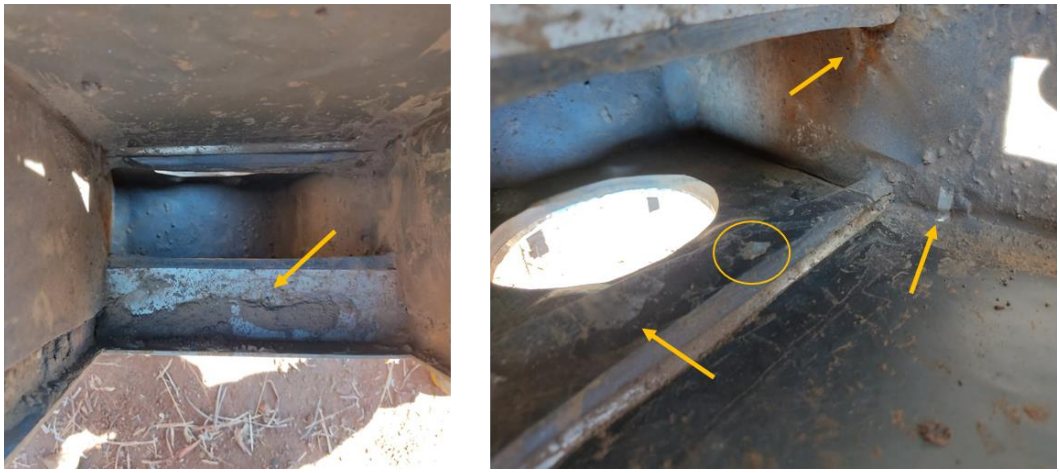


Figura 54. Desgaste da caixa do rotor superior do GHP-150.

Figura 55. Desgaste da caixa do rotor inferior do GHP-150.

A caixa-03, revestida de PU 82 A permaneceu por 193 dias em operação sendo retirada, conforme relatório de acompanhamento de manutenção das caixas dos separadores magnéticos da Itaminas, em 09/07/2020. A caixa-02, de revestimento de PU 95 A seguiu operando pelo tempo de análise deste estudo que foi finalizado em 18/08/2020.

Sumarizando, o tempo de operação das caixas está apresentado no esquema a seguir:

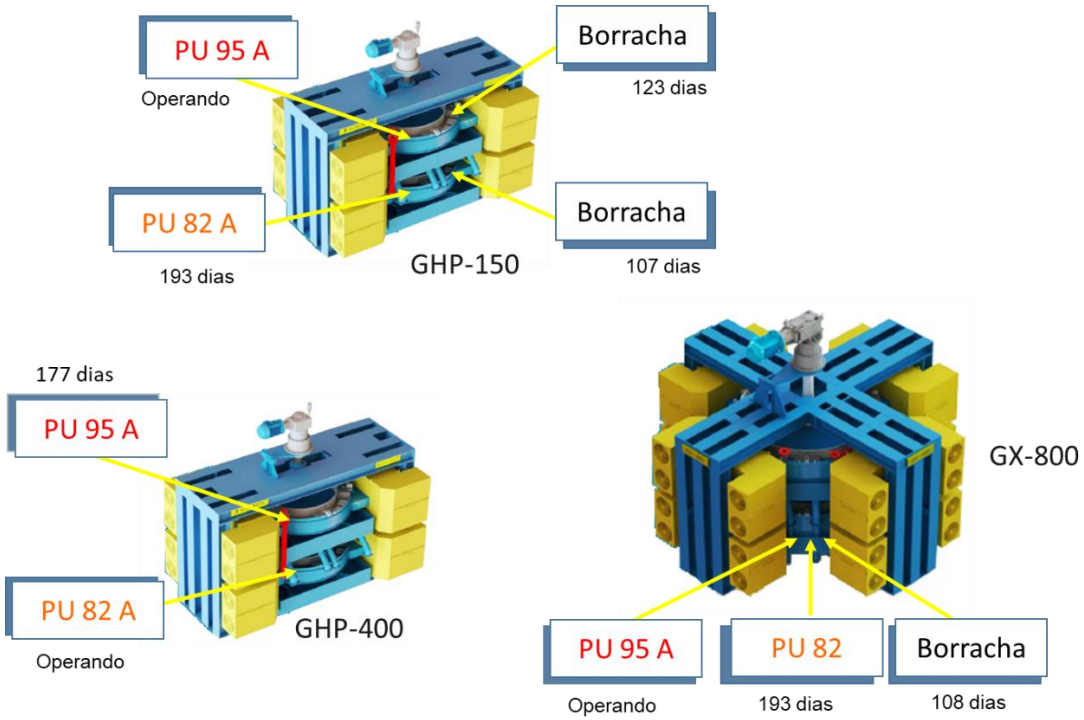


Figura 56. Esquema do tempo de operação das caixas nos separadores magnéticos

Em relação ao revestimento de borracha, observa-se que todas as três caixas apresentaram desempenho inferior quando comparadas aos revestimentos de poliuretano nas mesmas condições. No separador GHP 150, avaliando-se as caixas num mesmo rotor, tanto o PU de dureza 82 A, do rotor inferior, quanto o de dureza 95 A, do rotor superior, apresentaram maior vida útil que a caixa de borracha do mesmo rotor.

No separador magnético GX 800, estando as três caixas no mesmo rotor, e, portanto, sem influência da altura de alimentação da polpa, os revestimentos de poliuretano apresentaram melhor performance que o revestimento de borracha. Sobre os revestimentos de PU no separador GHP 400, o de dureza 82 A, ainda que no rotor inferior apresentou melhor performance que o de maior dureza.

Estudo realizado por Kurachenkov *et al*, citado por Beck (1998), descreve que a deformação da superfície de materiais macios estaria relacionada a sua característica elástica. Dessa forma, a ação constante provocada por partículas abrasivas contribuiria para a formação de sulcamentos na superfície e aparição de rebarbas que, por ação de fadiga resultariam em ruptura, aumentando o desgaste do material.

Tal resultado é também apresentado por estudo do desempenho de materiais poliméricos em ensaios de abrasão realizado por RAMOS NETO *et al* (2003). Ensaios abrasométricos do tipo pino-sobre-cilindro realizados segundo norma DIN 53.516 em amostras de borracha, poliamida, polietileno e poliuretano apontaram a borracha natural e os poliuretanos como materiais mais resistentes ao desgaste dentre os ensaiados. O estudo aponta que, ainda que a borracha natural tenha performado melhor que as poliamidas, polietilenos e a borracha sintética, o desempenho dos poliuretanos foi superior.

Em relação ao mecanismo de desgaste dos revestimentos, os autores RAMOS NETO *et al* (2003) relatam que análises macroscópicas evidenciam ocorrência de sulcos e redução de espessura. As imagens de microscopia eletrônica de varredura indicaram que o microcorte e microsulcamento representam maior perda de volume em comparação a microtrinca. Porém, o estudo aponta que não foi possível estabelecer correlação direta entre o desgaste e a dureza dos materiais.

De acordo com MORAES, *et al* (2005), o estudo que analisou o comportamento de quatro poliuretanos de diferentes durezas, produzidos pelos mesmos precursores, variando-se o % NCO livre no pré-polímero, a resposta ao desgaste abrasivo em poliuretanos estaria relacionada à dureza de forma inversa, o aumento de dureza do polímero levaria a uma redução da resistência ao desgaste abrasivo. No entanto, os mesmos autores observaram que, além da dureza, o aumento do alongamento do material e da resiliência colaboram para um aumento de resistência ao desgaste.

HUTCHINGS et al. (1987), em estudo sobre a erosão em borrachas e em um poliuretano, relataram uma correlação entre a resistência ao desgaste e a resiliência, atribuindo-se esse comportamento à absorção de parte da energia cinética da partícula erosiva pela superfície do elastômero.

O estudo de Oliveira (2011) para o desgaste abrasivo por deslizamento utilizando lixa de SiO_2 com granulometria 80 *mesh* em poliuretano sugere que o mecanismo de desgaste ocorreria incialmente, pelo contato entre as partículas da lixa e a superfície do revestimento estando essa interação relacionada à dureza do polímero. Em seu estudo, três formulações de mesma dureza e valor próximos de resistência ao rasgo apresentaram desempenhos diferentes em relação ao desgaste abrasivo. A formulação de pior desempenho entre as três analisadas também apresentou menores valores de alongamento e tensão de ruptura.

De acordo com Hill *et al* (1997), os poliuretanos podem ser separados em três regiões de dureza conforme Figura 57. Na região A, a taxa de desgaste reduz com o aumento da dureza. Entre 75 e 95 Shore A não há efeito significativo entre dureza e desgaste e na região C, o desempenho frente ao desgaste aumenta com o aumento da dureza.

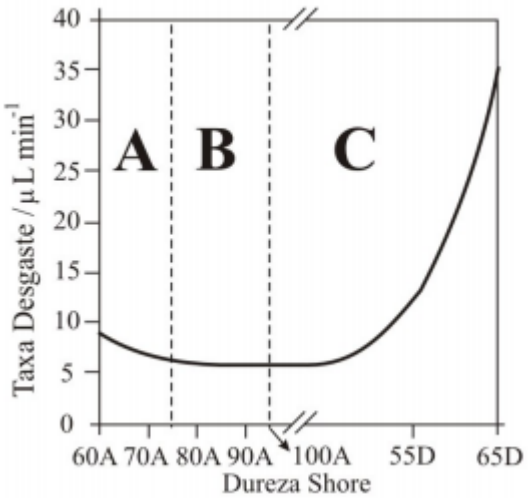


Figura 57. Relação aproximada entre a taxa de desgaste e dureza dos poliuretanos.

Fonte: Hill et al (1997) (adaptada)

Com base nessa referência, os dados aqui apresentados para o desempenho dos revestimentos de poliuretano das caixas dos separadores magnéticos com dureza 82 e 95 Shore A estariam na região B, não sendo possível, conforme foi apontado pelos resultados, determinar o melhor desempenho entre eles.

8. CONCLUSÃO

A partir da caracterização dos revestimentos de PU e, de acordo com os resultados em operação, conclui-se que os poliuretanos elastoméricos de dureza 82 e 95 Shore A podem ser aplicados como revestimento de caixas dos separadores magnéticos utilizados no setor de mineração, em substituição ao revestimento de borracha.

Os dados obtidos indicam que a diferença de posição das caixas nos separadores influencia no tempo de vida útil do dispositivo. Caixas de mesmo revestimento alocadas nos rotores superiores apresentaram, comparativamente, maior vida útil que as do rotor inferior para um mesmo separador. De forma comparativa, o desempenho desse elastômero, de ambas as durezas, foi superior ao da borracha em dias de utilização nos equipamentos, apresentando assim, melhora na operação das caixas e potencial redução de custo associado ao tempo de manutenção dos equipamentos.

A reforma das caixas de alimentação com aplicação de qualquer dos três revestimentos utilizados apresenta alternativa ao descarte, visto que, as caixas reformadas avaliadas neste estudo apresentaram tempo de vida útil semelhante às caixas novas. O reaproveitamento da estrutura metálica aumenta o tempo de uso do material estrutural da caixa, reduzindo o volume de resíduo descartado.

Embora alguns autores apontem a dureza como uma propriedade importante, nos testes realizados neste trabalho, não foi possível estabelecer relação entre o desgaste e a dureza dos elastômeros avaliados.

9. TRABALHOS FUTUROS

A partir deste estudo, sugere-se as seguintes análises para trabalhos futuros:

- Avaliação do perfil de desgaste dos revestimentos das caixas após operação por microscopia eletrônica de varredura;
- Avaliar de forma conjunta propriedades como dureza, alongamento máximo, resiliência e abrasão afim de tentar estabelecer correlações numéricas entre elas para os tipos de poliuretanos e a borracha;
- Avaliar a quantidade de vezes que uma caixa poderia ser reformada, performando de forma similar às caixas novas em relação aos dias em operação.

REFERÊNCIAS

ASTM G76 – 18. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets. **ASTM – American Society of Testing Materials**. [s.l: s.n.].

BECK, R. A.; TRUSS, R. W. Effect of chemical structure on the wear behaviour of polyurethane-urea elastomers. **Wear**, v. 218, n. 2, p. 145–152, 1998.

BHUSHAN, B. **Modern Triboly Handbook: Principles of Tribology**. Primeira e ed. [s.l: s.n.].

BRITZ, J. Abrasão é inimigo letal da produção. **Revista de Minérios e Minerales**, 2014.

CABRAL, E. L. **Síntese E Caracterização De Poliuretanos Bioestáveis Com Potencial Aplicação Na Área Cardiovascular**. [s.l: s.n.].

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAMPOREZ, R. M. Comportamento tribológico do par polimérico polipropileno e poliamida em diversas condições de lubrificação. p. 112, 2018.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos Polimeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

COUTINHO, F. M. B.; DELPECH, M. C. Poliuretanos como Materiais de Revestimento de Superfície. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 9, n. 1, p. 41–48, 1999.

CRISÓSTOMO, R. C. **A Separação Magnética de Minérios de Ferro no Brasil- Uma Revisão**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

FERROUS. **Fluxograma explicado**. Disponível em: <https://www.ferrous.com.br/uploads/infografico/fluxogramaFerrous.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2019.

GAHR, K.-H. ZUM. **MICROSTRUCTURE AND WEAR OF MATERIALS**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987.

GANDOLF, M. **Desenvolvimento De Um Pré-Polímero De Uretana a Base De Óleo De Mamona E Tolueno Diisocianato (TDI)**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

GAUSTEC. **GHX-1400 Separador Magnético [PT] - Gaustec**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=6qm1EfG2YO8&list=PLbE4TrTyFGDyJnzP59saEMf5LpVloeEiN&index=2&t=61s>.

HAGE JR., E. Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. **Polímeros**, v. 8, n. 2, p. 6–9, 1998.

HAMESTER, L. S. , SANTANA, R. M. C., FORTE, M. M. C. Pré-polímeros de pu de alta funcionalidade a partir de poliéter diol. **CBPol**, n. Mdi, 2009.

HEPBURN, C. **Polyurethane elastomers**. 2ª ed. [s.l.] ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS LTD, 1991. v. 16

JOST, H. P. Tribology — Origin and future. **Wear**, v. 136, p. 1–17, 1990.

KLOSS, J. R. et al. **Síntese e caracterização de Poliuretanos biodegradáveis à base de poli(E-Caprolactona)diol**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2007.

LUCAS, ELIZABETE F., SOARES, BLUMA G., MONTEIRO, E. E. C. **Caracterização de polímeros: determinação de peso molecular e análise térmica**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2001.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, JOÃO ALVES; FRAÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5ª ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

MANO, E. B. **Introdução a polímeros**. 2ª ed. São Paulo: EDGARD BLÜCHER LTDA., 2004.

MASSOLA, C. P. **Abrasão – corrosão em corpos moedores na moagem de minério de ferro**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2015.

MORASSI, O. J. Polímeros termoplásticos, termofixos e elastômeros. **Conselho Regional de Química IV Região (SP)**, p. 158, 2013.

OLIVEIRA, H. P. S. **Contribuição ao estudo do desgaste erosivo e abrasivo de poliuretanos utilizados na indústria mineradora e petrolífera**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

PRISACARIU, C. **Polyurethane elastomers: From morphology to mechanical aspects**. NewYork: SpringerWienNewYork, 2011. v. 112

RAMOS NETO, F. F. et al. Desgaste Abrasivo de Materiais Poliméricos Utilizados Na

Proteção De Linhas Flexíveis de Condução de Petróleo. **13° POS MEC - Simpósio do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica**, 2003.

RIBEIRO, J. P.; RIBEIRO, C. H. T. New mega-sized wet high intensity magnetic separator: a cost-effective solution to reclaim iron ore fines from tailing dams. v. 66, n. 4, p. 529–533, 2014.

ROCHA, R. B. **CONCENTRAÇÃO DE REJEITO DE FLOTAÇÃO E LAMAS DE MINÉRIO DE FERRO POR SEPARAÇÃO MAGNÉTICA**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

ROCHA, R. J. et al. Síntese de poliuretanos modificados por óleo de mamona empregados em materiais energéticos. **Quimica Nova**, v. 36, n. 6, p. 793–799, 2013.

SANTOS, D. G. **ESTUDO TERMO-HÍDRICO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADOS COM FIBRA VEGETAL: SIMULAÇÃO 3D E EXPERIMENTAÇÃO**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, 2017.

SINATORA, A. **TRIBOLOGIA: UM RESGATE HISTÓRICO E O ESTADO DA ARTE**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2005.

ULRICH, H. POLYURETHANES. In: **Encyclopedia of Polymer Science and Technology**. [s.l: s.n.]. v. 4p. 26–72.

VALIM, P. **75 anos do poliuretano**. Disponível em: <https://www.bayerjovens.com.br/pt/fique-ligado/novas-ideias/visualizar/?materia=poliuretano>.

VILAR, W. **QUÍMICA E TECNOLOGIA DOS POLIURETANOS**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2004.