

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MARCELO LEITE GAMBI

**MECANISMO AUTO CICATRIZAÇÃO COM ÊNFASE EM LIGAS
METÁLICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2019

MARCELO LEITE GAMBI

**MECANISMO AUTO CICATRIZAÇÃO COM ÊNFASE EM LIGAS
METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais (DAEMA) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito parcial de obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Andreato

Co-Orientadora: Prof.^a Dra. Silvia Midori Higa

LONDRINA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

MARCELO LEITE GAMBI

MECANISMO DE AUTO CICATRIZAÇÃO COM ÊNFASE EM LIGAS METÁLICAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 09 de julho de 2019 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Raphael Prestes Salem
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Márcio Andreato Batista Mendes
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por ter proporcionado esse momento tão especial.

Agradeço a minha família, em especial a minha mãe Sônia por todo o esforço para que eu chegasse até esse momento mesmo passando por dificuldades nunca desistiu e me fez lutar para essa conquista. Aos meus irmãos Marcos Júnior e Maria Eduarda por todo o apoio.

À minha prima Paula por acreditar em mim e contribuir para que esse momento fosse possível. A todos os tios, tias, primas e primos que de alguma forma contribuíram para que esse trabalho fosse possível.

À Joyce, por todo o apoio, motivação para a realização desse projeto e pela companhia em todos os momentos.

Agradeço a todos os meus professores que ao longo dessa jornada foram pacientes e atenciosos para a minha formação agregando conhecimento e nos preparando para o mercado de trabalho. Porém em especial ao meu orientados Márcio Andreato e co-orientadora Silvia Higa por acreditar no projeto e fazer com que tudo isso fosse possível.

A todos os colegas que de alguma forma contribuíram para que esse momento fosse possível.

E a UTFPR-Londrina por ter me dado a chance e as ferramentas necessárias para que pudesse chegar ao final desse ciclo de maneira satisfatória.

“Que todos os nossos esforços estejam sempre focados no desafio à impossibilidade.

Todas as grandes conquistas humanas vieram daquilo que parecia impossível”.

(Charles Chaplin).

RESUMO

GAMBI, M. L. **Mecanismo auto cicatrização com ênfase em ligas metálicas**. 2019. 40 f. Monografia (Bacharelado) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

A auto cicatrização em metais nada mais é que o fechamento de uma trinca gerada em serviço em um material, através do fechamento espontâneo, ou não, para que assim possa diminuir custos com reparação e substituição do material. O mecanismo de auto cicatrização é bastante estudado para materiais de engenharia, porém ainda não é muito utilizado para os materiais metálicos devido a estes materiais requererem altas temperaturas para difusão e, assim, demandarem muita energia para o deslocamento de átomos para a região onde contenha uma trinca. O fenômeno de auto cicatrização é muito estudado em polímeros, compósitos e concretos, sendo possível diversos mecanismos de auto cicatrização nesses materiais. Para os metais, no primeiro estudo realizado no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), foi observado o fechamento de uma trinca em uma amostra de níquel ao aplicar tensões compressivas e energia térmica sobre uma liga de níquel. Este trabalho tem por objetivo estudar uma rota viável de mecanismo de auto cicatrização para os materiais metálicos com o auxílio da literatura e artigos da área, a fim de consolidar esse conceito tão importante para o futuro da engenharia, pois irá permitir aplicações com maior durabilidade.

Palavras chaves: Auto cicatrização. Materiais metálicos. Eletrocicatrização. Durabilidade

ABSTRACT

GAMBI, M. L. **Self-healing mechanism with emphasis on metallic alloys**. 2019. 40 f. Monography (Bachelor) - Department of Materials Engineering, Federal Technological University of Paraná, 2019.

The concept of self-healing in metals is nothing more than the closing of a crack generated in service in a material, through external interference or not, so that it can reduce costs with repair and replacement of the material. The mechanism of self-healing is a well-studied concept for engineering materials, but is not yet widely used for metallic materials because these materials require high temperatures for diffusion and thus require a lot of energy for the displacement of atoms to the region where it contains a crack. The phenomenon of self-healing is widely used in polymers, composites and concrete, and several mechanisms of self-healing are possible in these materials. For metals, in the first study conducted at the Massachusetts Institute of Technology (MIT), a crack was observed in a sample of nickel by applying compressive stresses and thermal energy over a nickel alloy. The aim of the study a viable route for the self-healing mechanism for metallic materials with the help of literature and articles in the area in order to consolidate this concept so important for the future of engineering as it will allow applications with greater durability.

Keywords: Self-healing. Metallic materials. Electrohealing. Durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma metodologia apresentada.	21
Figura 2. Esquema mecanismo auto cicatrização em materiais compósitos por microcápsulas.	24
Figura 3. Esquema mecanismo auto cicatrização em materiais compósitos.....	25
Figura 4. Esquema do mecanismo de auto cicatrização para materiais cerâmicos estruturais.	26
Figura 5. Etapas de ativação (1) Limpeza eletrolítica; (2) Ativação por HCl e (3) Recobrimento de Ni.....	29
Figura 6. Trincas por fadiga antes do processo de aplicação de corrente por eletropulsão. ...	29
Figura 7. Trincas por fadiga sendo fechadas após 8 aplicações de corrente por eletropulsão.	30
Figura 9. Trincas por fadiga sendo fechadas após 35 aplicações de corrente por eletropulsão	30
Figura 10. Comparação antes e após aplicação dos pulsos de correntes.	30
Figura 11. Modelo esquemático do processo de auto cicatrização por eletropulsão.....	31
Figura 12. Gráfico de relação tempo vs temperatura vs tamanho da microtrinca.....	32
Figura 13. Curva tensão x deformação e métodos de análises das amostras.	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3 JUSTIFICATIVA	13
4 REFERENCIAL TEÓRICO	14
4.1 Ligas metálicas	14
4.2 Defeitos	15
4.3 Mecanismos de fratura.....	17
4.4 Auto cicatrização	19
5 METODOLOGIA	21
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
6.1 Auto cicatrização	22
6.1.1 Auto cicatrização de materiais não metálicos	22
6.1.2 Auto cicatrização em ligas metálicas.....	27
6.2 Relação: Tipo de material versus mecanismos self healing.....	34
7 CONCLUSÃO	36
8 TRABALHOS FUTUROS	38
REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

Os materiais metálicos são extensivamente utilizados em aplicações estruturais nas indústrias de petróleo, química, automotiva, aeronáutica e tantas outras áreas da engenharia. A grande versatilidade de utilização destes materiais está atrelada às suas propriedades, como resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, condutividade elétrica e térmica, bem como a sua elevada capacidade de conformação em diferentes geometrias e formatos a partir de diversas rotas de processamento, como fundição, extrusão, forjamento, usinagem e soldagem (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Quando os metais são submetidos a processamentos metalúrgicos e/ou mecânicos para a formação de produtos metálicos, deve-se minimizar as falhas e defeitos intrínsecos aos processamentos, quanto à estrutura e forma do material, para elevar sua vida útil e não comprometer sua aplicação. Um dos principais defeitos gerados nos metais, devido ao seu processamento e durante sua utilização, são trincas internas e superficiais. Por isso, além dos métodos de prevenção da ocorrência desses defeitos, nota-se a necessidade de estudo dos métodos de reparação das trincas, como os fenômenos de auto cicatrização (ZHENG; SHI; LOU, 2015).

O modo mais frequente de um material falhar é pela iniciação de uma trinca e sua consequente propagação. Portanto, a necessidade de um mecanismo de reparação ou cicatrização em materiais é altamente interessante, não apenas pelo lado econômico, mas também, para uma aplicação mais confiável. A cicatrização em sólidos envolve a mobilidade atômica do agente de cicatrização e a sua ligação com os átomos da superfície da trinca (ZHENG; SHI; LU, 2013).

Atualmente, as pesquisas desse mecanismo se concentram em materiais poliméricos, com êxito na cicatrização desses materiais. Estudos relacionados a polímeros consistem em promover a cicatrização com a penetração de um líquido encapsulado na superfície da trinca à temperatura ambiente. Por outro lado, para os materiais metálicos, isso é um desafio, pois, à temperatura ambiente, a mobilidade atômica e difusividade é muito baixa e, aliando as elevadas temperaturas de fusão apresentadas por esses materiais, o estudo do mecanismo por este método pode ser dificultado. No entanto, mesmo sendo um desafio, o estudo nessa área vem sendo cada vez mais explorado nos últimos anos (ZHENG; SHI; LU, 2013).

Para gerar um aumento na mobilidade atômica nos metais é necessário elevar a temperatura para facilitar a difusão e, conseqüentemente, a cicatrização das trincas ou vazios

ser favorecida. Estudos realizados por Gao et al (2002) demonstram resultados satisfatórios para cicatrização de micro-trincas em corpos de prova constituídos de Fe- α , utilizando temperaturas acima de 727°C. Essa elevação de temperatura pode ser benéfica no caso da cicatrização, porém também pode ocasionar alterações microestruturais e nas propriedades do material, podendo resultar em efeitos indesejáveis. Outro ponto a ser observado é que, como a difusão é lenta em temperaturas baixas, geralmente essa reparação é aplicada para cicatrização de trincas de tamanhos micrométricos nos metais (ZHENG; SHI; LU, 2013).

A auto cicatrização (*self-healing*, em inglês) é atualmente uma tendência no mercado, pois cada vez mais se busca a diminuição de custo e menor tempo de parada para substituições de peças e equipamentos. Os materiais estão sempre sujeitos a falhas estruturais, que podem ser ocasionadas pela propagação das trincas geradas pelos esforços aos quais o material está submetido, como também por defeitos gerados por processos de fabricação. Porém, tem-se uma grande dificuldade na detecção dessas trincas, pois muita das vezes a iniciação ocorre com nano ou microfissuras que se propagam até o colapso do material (VASCONCELOS, 2011).

Neste contexto, dentre a vasta gama de metais utilizados na indústria, as ligas metálicas são de grande interesse devido às suas propriedades mecânicas a altas temperaturas e resistência a corrosão. Em vista disso, o presente projeto visa estudar o mecanismo de auto cicatrização nos materiais de engenharia com ênfase nos materiais metálicos, desenvolvendo uma metodologia de estudo sobre o tema com pesquisas bibliográficas em teses, dissertações, artigos, revistas e assim promover uma base para pesquisas práticas sobre o mecanismo de auto reparação e auxiliar pesquisas futuras de cunho acadêmico e industrial devido a importância desse assunto para a engenharia. Com esse mecanismo cada vez mais sendo estudado e aplicado, mais técnicas de auto cicatrização serão conhecidas e com os resultados obtidos maior será a viabilidade no meio industrial.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo estudar uma metodologia de estudo para auto cicatrização de trincas em materiais de engenharia com ênfase em ligas metálicas e, assim reduzir falhas catastróficas causadas por trincas internas oriundas de processos de fabricação dos materiais e por trincas de fadiga.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar o processo de auto cicatrização para os materiais de engenharia;
- Conhecer e entender o funcionamento do mecanismo para os materiais poliméricos, cerâmicos e compósitos e assim buscar semelhanças para os materiais metálicos;
- Promover o estudo desse mecanismo para os materiais metálicos, que possa trazer vários benefícios para empresas automobilísticas, aeronáutica, aeroespacial;
- Avaliar a partir de todos os mecanismos já estudados para os materiais poliméricos, cerâmicos e compósitos uma rota viável para auto cicatrização de materiais metálicos.

3 JUSTIFICATIVA

Os metais são amplamente usados no dia-a-dia, como em automóveis, aplicações estruturais, indústria aeronáutica, indústria química, petrolíferas, entre outras. Uma das principais falhas que ocorrem nos materiais são as fraturas ocasionadas pelo surgimento de trincas durante o processamento ou causadas por outros fatores em serviço.

Com o surgimento de uma trinca e regeneração da mesma pelo mecanismo de auto cicatrização e, com isso, promover uma diminuição nos custos de substituições de materiais, o presente trabalho prevê verificar as condições para que seja propiciada a regeneração de uma trinca nas diversas classes de materiais de engenharia, apresentando resultados obtidos por meio de estudos práticos. Segundo Xu e Demkowicz (2013), é possível realizar o fechamento dessas trincas aplicando uma tensão sobre o material com a mesma intensidade em que ela poderia ser fraturada, ou seja, onde atinja a tensão crítica.

Esse fenômeno auto cicatrizante nos metais é de extrema importância de estudo, principalmente no caso de materiais submetidos a ambientes extremos, uma vez que levanta a possibilidade de regeneração desses materiais, evitando assim que uma possível trinca se propague até a fratura final. São exemplos de áreas a serem impactadas por esse estudo as indústrias de petróleo e aeronáutica, que faz extenso uso de aços inoxidáveis e das superligas de níquel, respectivamente, e, também, devido às dificuldades encontradas na realização de manutenção de equipamentos em uso.

A escolha desse tema tem grande contribuição para a Engenharia de Materiais, pois, além de analisar os conceitos envolvidos no comportamento das trincas, como o movimento das discordâncias e movimento de contornos de grãos, o conhecimento que será gerado por esse estudo pode contribuir para a redução da substituição de equipamentos que muitas vezes demanda um maior investimento por parte das empresas. Outra grande contribuição para a engenharia é apresentar um tema pouco estudado para os materiais metálicos, porém com grandes contribuições futuras para o desenvolvimento de novos materiais.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Ligas metálicas

Os materiais metálicos de engenharia são compostos por um ou mais elementos metálicos (por exemplo o ferro, alumínio, cobre, titânio, níquel...) e, muitas vezes também por elementos não-metálicos (como o carbono, nitrogênio e oxigênio) em menores quantidades. Nesse grupo de materiais, os átomos estão arrançados de uma maneira bastante ordenada, e, quando comparados a outros materiais como os polímeros e as cerâmicas, são densos (CALLISTER, 2012).

Em relação às suas características mecânicas, são rígidos, resistentes, dúcteis e resistentes à fratura; sendo que essas características permitem que esses materiais sejam aplicados em projetos estruturais que requerem grande resistência. Os materiais metálicos possuem um grande número de elétrons livres e algumas das propriedades, como condutividade elétrica e térmica, propriedades ópticas e magnéticas, estão diretamente relacionadas a esses elétrons livres (CALLISTER, 2012).

Dentre suas principais propriedades mecânicas se destacam o limite de resistência a tração, ductilidade, resiliência e tenacidade. Essas propriedades são importantes e podem ser obtidas por meio de ensaio de tração, obtendo-se uma curva tensão-deformação, a partir da qual se analisa o comportamento do material e determina suas propriedades. A tenacidade a fratura é uma propriedade que será abordada de forma mais intensa nos próximos tópicos.

A intenção do desenvolvimento de uma liga é a variedade de propriedades mecânicas que essas ligas conseguem proporcionar quando aplicadas. A adição de elementos de ligas como o níquel e o cromo a aços carbonos, por exemplo, favorece a formação de filmes passivos que combatem a corrosão no material. Isso é interessante, pois se aproveita as boas propriedades mecânicas dos aços carbonos, aliados a um custo relativamente baixo, fornecendo melhores propriedades anticorrosivas (VASCONCELOS, 2011).

Ao adicionar um elemento de liga numa matriz de metal puro, é necessário que esse elemento seja compatível com a matriz sendo que essa compatibilidade engloba vários fatores como raio atômico, sistema cristalino, entre outros. Somente com a proporção adicionada de elemento não é possível prever que será uma liga monofásica ou bifásica, um exemplo disso é uma liga latão onde ao adicionar 20% Zn temos uma liga monofásica enquanto que uma

pequena quantidade de carbono no ferro na faixa de 0,03% formará uma liga bifásica. Essas adições de elementos nas estruturas ocasionam importantes modificações nas propriedades dos materiais (DA SILVA; HOMEM, 2008).

As ligas metálicas têm diversos pontos positivos, desde o processo de elaboração da liga até a sua utilização. No processo de elaboração, a vantagem econômica acontece já que o material nobre é substituído geralmente por um material de menor, podendo também de maior valor quando esse material possui melhores propriedades que a matriz, e que na maioria das vezes ocorre o ganho com processamento já que esses elementos podem abaixar a temperatura de fusão do material (DA SILVA; HOMEM, 2008).

A qualidade pode ser aumentada com adição desses elementos, por exemplo o Al nos aços que evitam a formação de poros durante a solidificação como também adição de Pb em bronzes para melhorar o vazamento durante o processamento. Outra razão para o desenvolvimento de ligas metálicas é a busca por melhores propriedades mecânicas, que no geral com a adição do elemento aumenta a dureza e a resistência mecânica, diminuindo a ductilidade do material. Ainda com tratamento térmico da peça é possível obter melhores propriedades de acordo com a necessidade e os esforços submetidos na peça (DA SILVA; HOMEM, 2008).

Um exemplo no cotidiano de ligas metálicas são os aços inoxidáveis que contém em sua estrutura elementos de níquel e cobre com o objetivo de formar filmes passivos para evitar a corrosão. Nesse caso esses elementos são adicionados ao aço carbono que geralmente têm um valor mais baixo, e já com a adição desses elementos e o ganho de propriedades anticorrosivas e mecânicas o valor comercial desses aços crescem de uma forma exorbitante (DA SILVA; HOMEM, 2008).

4.2 Defeitos

Os materiais estão sujeitos a presença de impurezas que podem levar a distorções na rede e possuem defeitos cristalinos. Esses defeitos podem ser pontuais, como quando ocorre presença ou falta de um átomo na rede de natureza substitucional, intersticial ou lacunas . Podem ser lineares, no caso das discordâncias que seguem um longo e complexo caminho pela estrutura cristalina. E por último esses defeitos podem ser do tipo planares que representam o limite entre uma região cristalina quase perfeita dos seus entornos (SHACKELFORD, 2008).

Quando as imperfeições estão associadas a presença ou falta de um átomo na rede cristalina, esses são chamados de defeitos pontuais. Dentre os mais comuns estão a vacância e a presença de átomos de natureza intersticial. Shackelford (2008) define vacância como sendo simplesmente um sítio atômico não ocupado no material e átomo intersticial como um átomo de pequeno volume ocupando uma posição intersticial na rede. Nos metais os defeitos pontuais provocam uma distorção grande pois geralmente o átomo é maior que a posição intersticial. Callister (2012) diz que em cristais iônicos, um pequeno cátion pode abandonar seu sítio criando uma lacuna catiônica, e ficando dissolvido intersticialmente na estrutura, esse par de defeitos é chamado de defeito de Frenkel. Já quando uma lacuna catiônica é associada a uma lacuna aniônica, ao invés de um cátion intersticial, o par de defeitos é chamado de defeitos de Schottky.

Defeitos lineares são associados principalmente a deformação mecânica e são conhecidos como discordâncias, sendo causadas pelo desalinhamento dos átomos. Devido a mobilidade desses semi-planos que se deslocam sobre planos ou direções com maior densidade atômica, esses defeitos respondem pela ductilidade dos metais a temperatura ambiente, pois reduzem a tensão cisalhante necessária para que se tenha o escorregamento se comparado com a tensão necessária para um metal livre de discordâncias. Essa redução viabiliza a deformação plástica nos metais, podendo citar uma contribuição dessa redução no processamento de peças acabadas (JAMBO, M; FOFANO, 2009).

As discordâncias podem ser do tipo aresta, espiral e mista. No caso das discordâncias de aresta, o defeito ocorre quando se tem um plano de átomos extras na estrutura cristalina, e nesse caso o vetor de Burgers é perpendicular a linha de discordâncias. Discordâncias espiral, no qual o vetor de Burgers é paralelo a linha de discordâncias, é consequência da tensão cisalhante aplicada para produzir uma distorção. O último tipo é o mais comum nos materiais cristalinos e exibe os componentes dos outros tipos de discordâncias, é chamada de discordância mista. Os defeitos pontuais e lineares são confirmações que os materiais não são isentos de falhas, pois estas estão presentes no interior desses materiais. Como exemplos desses defeitos pode-se citar os contornos de maclas, contornos de grãos e fases (CALLISTER, 2012; SHACKELFORD, 2008).

Além destes defeitos, os materiais podem apresentar defeitos volumétricos que acontecem numa escala muito maior nos materiais, geralmente introduzidos durante os processos de fabricação e que afetam diretamente as propriedades. Exemplos desses defeitos são as inclusões, poros, trincas e precipitados.

4.3 Mecanismos de fratura

Os materiais estruturais estão sempre convivendo com presença de descontinuidades, seja em maior ou menor intensidade. Como mencionado acima essas descontinuidades agem sobre os materiais como defeitos oriundos do processo de fabricação, podem surgir em função da solicitação a que está submetido, ou na forma de defeitos dos materiais. A importância do estudo desses mecanismos é evitar que projetos futuros venham a sofrer fraturas não esperadas, como ultimamente pode ser observados em aeronaves, vasos de pressão, cascos de navios, vigas, entre outros (CAVALCANTE, 2016).

Segundo Cavalcante (2016), esse estudo começou a ser desenvolvido quando as falhas que aconteciam não poderiam ser explicadas pelos cálculos estruturais, pois muitas vezes ocorria abaixo das tensões admissíveis do material.

Segundo Downing (2013), o estudo da mecânica da fratura é de extrema importância para a engenharia pois as trincas e falhas ocorrem com frequência nos materiais em serviço. Uma inspeção periódica, por exemplo, em uma aeronave revela trincas que devem ser reparadas e após uma análise criteriosa decidir se a trinca será reparada ou o material substituído. Esse é apenas um exemplo dentro da ampla utilização dos materiais, utilizados em estruturas de navios, automóveis, tubulações, reatores entre outros.

Para escolha de um determinado material para uma aplicação deve-se levar em conta suas propriedades e valores de resistências mecânicas, tenacidade, ductilidade, temperatura de trabalho que são obtidos por meio de testes de tração, fluência, compressão, flexão, entre outros. Porém esses testes levam em consideração apenas falhas microscópicas e não contabilizam trincas maiores, portanto levam em consideração que nenhuma trinca macroscópica esteja presente, apenas as inerentes ao processo de conformação (DOWNLING, 2013).

Por isso a mecânica da fratura fornece propriedades que podem ser relacionadas ao comportamento do componente, permitindo uma análise mais específica da vida útil do material e sua tensão suportada. Algumas constantes que se leva em consideração são o tamanho da trinca, geometria da trinca, tipo do material e esforços em que estão submetidos. Para uma aplicação mais confiável é necessário que várias técnicas de análises sejam feitas como ultrassom e raios X para detecção de presença e tamanho de trincas. Essas técnicas são utilizadas para detecção em pontes, prédios, aeronaves (DOWNLING, 2013).

O objetivo da mecânica da fratura é analisar materiais ou estruturas que contêm trincas e fornecer respostas para efeito de projeto. A determinação do tipo de trinca será importante a

fim de possibilitar prever se essa trinca irá ou não levar o material à fratura catastrófica em tensões e condições permitidas em serviço. A mecânica da fratura fornece valores quantitativos quanto à tenacidade do material a fratura além de segurança e viabilidade econômica (CAVALCANTE, 2016).

Quando o assunto é mecanismos de fratura e se quer um material mais resistente a tenacidade à fratura é a propriedade de maior interesse. A tenacidade à fratura é a capacidade do material em absorver energia quando houver a presença de trincas. Em um ensaio de mecânica da fratura, a tenacidade é a dissipação de energia que ocorre na ponta da trinca durante a sua propagação, a capacidade de propagação depende de fatores como tamanho e geometria da trinca e é determinado pelo valor encontrado de K_{I} . Não pode confundir tenacidade à fratura com a tenacidade do material, a tenacidade do material pode ser obtida por meio de um ensaio de tração ou num ensaio de impacto. A partir do ensaio de tração a área abaixo da curva tensão-deformação refere-se à tenacidade do material. (CASTRO, JAIME ; MEGGIOLARO, 2009; CAVALCANTE, 2016; ROSA, 2002).

Na década de 20, Griffith propôs que a diferença da resistência a coesão teórica e a resistência à fratura poderia ser explicada pela presença de defeitos ou trincas microscópicas que sempre existiam sob condições normais na superfície e no interior do material. Esses defeitos existentes prejudicam a resistência à fratura do material, pois uma tensão aplicada pode ser ampliada ou concentrada na extremidade da trinca onde a magnitude da ampliação da tensão depende da orientação e geometria da trinca. Essa ampliação de tensão não está restrita somente a esses defeitos microscópicos, podem ocorrer também em vazios e cantos vivos, ou seja, defeitos macroscópicos. Quando ocorre a ampliação da tensão aplicada, esses defeitos são chamados de concentradores de tensão (CALLISTER, 2012).

Esse defeito é mais intenso em materiais frágeis, ao contrário dos materiais dúcteis, que sofrem deformação plástica que resulta na distribuição da tensão na vizinhança dos concentradores de tensão e no desenvolvimento de um fator de concentração de tensão menor que o teórico. Esse escoamento e redistribuição de tensão não ocorrem nos materiais frágeis, portanto haverá uma concentração de tensão teórica (CALLISTER, 2012).

Griffith então desenvolveu a teoria, com base no balanço de energia, em que os materiais frágeis contêm micro trincas e defeitos com tamanho, geometria e orientações variadas. A fratura então ocorrerá quando aplicado uma tensão e a resistência de coesão for excedida na extremidade dessas trincas e defeitos fazendo com que ocorra uma propagação rápida da trinca (CALLISTER, 2012).

Um processo de falha é caracterizado basicamente por três etapas distintas, são elas:

1. Iniciação da trinca
2. Propagação da trinca
3. Falha final

No caso de fratura por fadiga, as trincas sempre nucleiam a partir da superfície do componente em pontos em que contém concentradores de tensões. Esses pontos de nucleação podem ser riscos, ângulos vivos presentes, rasgos de chaveta entre outros. Ao aplicar uma carga cíclica pode-se desenvolver concentradores de tensões e assim iniciar uma trinca, pois essas cargas produzem defeitos microscópicos que resultam em degraus de escorregamento de discordâncias (CALLISTER, 2012).

4.4 Auto cicatrização

Trincas e vazios provenientes de processos de fabricação e até mesmo de usos em serviço resultam numa maior deterioração do material e, conseqüentemente, resultarão em sérios problemas relacionados à segurança da estrutura. Cada vez mais os materiais para uso estruturais têm uma tendência de possuir uma espessura menor, resistentes e mais leves dependendo da sua aplicação, provocando uma probabilidade maior desses defeitos aparecerem. Por isso, uma fase importante em um projeto é a escolha correta das dimensões de um material e sua composição (XIN et al., 2017).

Segundo Griffith, uma trinca não pode ser restaurada por ser um processo irreversível, mas uma trinca muito estreita poderia ser recuperada se passasse por um tratamento térmico suficiente para que os átomos ao de cada lado da trinca migrem para um arranjo mútuo por meio de agitação térmica para dentro da fenda fazendo a recuperação. Com isso o número de estudos relacionados a auto cicatrização dos materiais vêm aumentando com o passar dos anos (XIN et al., 2017).

Segundo Ghosh (2009), o fenômeno de auto cicatrização pode ser definido como sendo a habilidade dos materiais em recuperar ou reparar uma falha automaticamente e autonomamente sem a interferência externa. Porém, sabe-se que alguns materiais para atingir essa habilidade necessitam de alguns fatores para acontecer, como a introdução de temperatura, uma força, uma corrente elétrica, entre outros. Esse conceito de auto reparação nos materiais de engenharia é derivado da biologia e de seus sistemas que possuem uma capacidade de regenerarem (CAVALCANTE, 2016; GHOSH, 2009).

Alguns materiais metálicos possuem uma capacidade de se auto recuperarem de trincas, portanto menores serão as substituições prematuras desses materiais, e assim indiretamente ocorrerá uma contribuição para a diminuição na produção desses componentes. Para que essa auto reparação ocorra, alguns procedimentos são realizados, como o tratamento térmico, deformação plástica, precipitação, eletro-cicatrização, eletropulsagem (REN et al., 2017; ZHENG; SHI; LOU, 2015).

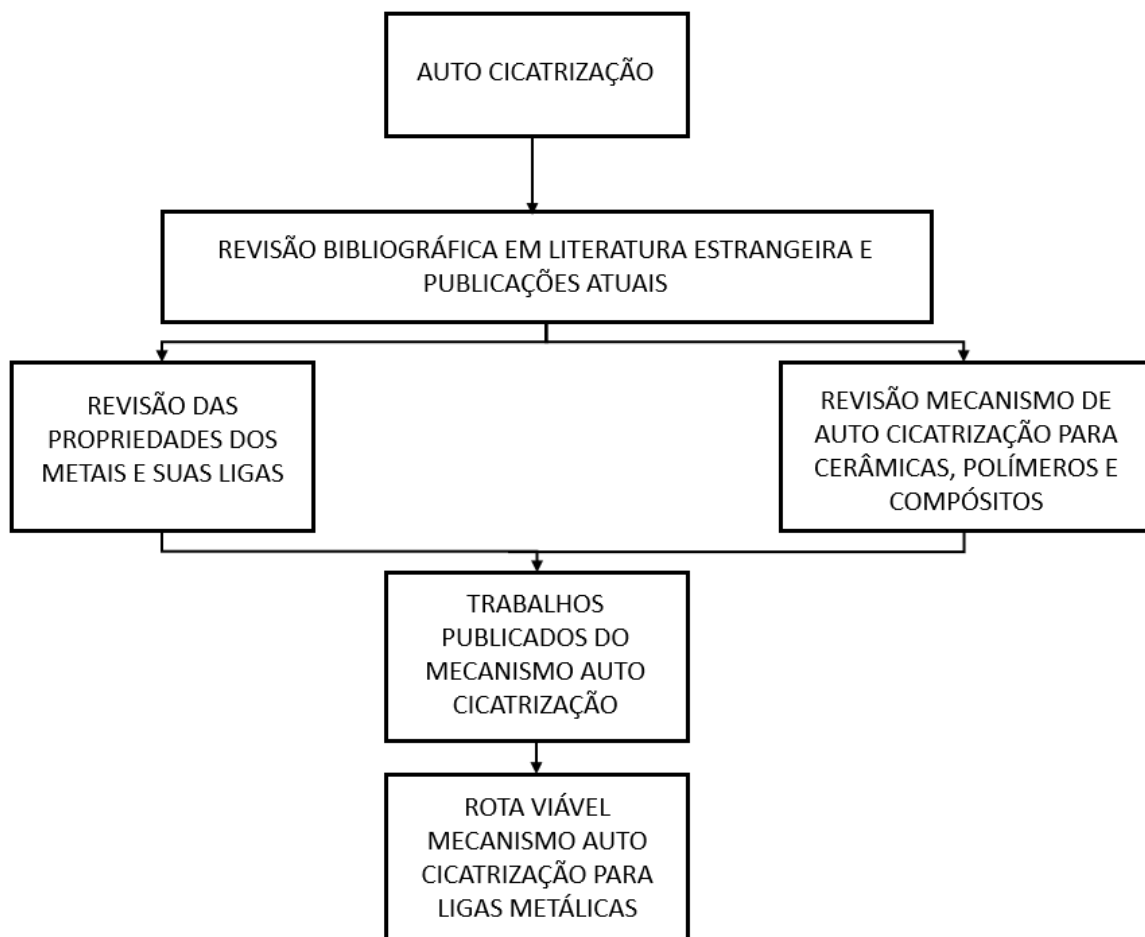
Como pode ser notado a auto cicatrização não é mais um assunto tão distante nos dias atuais, e isso ocorre principalmente devido ao avanço da ciência e, também, à necessidade de materiais que se recuperem dos seus defeitos sem a necessidade de serem substituído. Muitos estudos são direcionados à cicatrização dos materiais e àqueles já comercializados na área polimérica e em cerâmicas, como, por exemplo, na introdução de microcápsulas com um material que regenera a trinca. Já os estudos para os metais são recentes e são direcionados ao alumínio, à aço baixo carbono, ao níquel, entre outros.

5 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desse projeto, a metodologia utilizada foi a de pesquisa bibliográfica em livros, handbooks, artigos, teses, dissertações e revistas recentes sobre materiais que possuem a capacidade de regenerarem e, assim, estudar os métodos e resultados utilizados atualmente, bem como promover um maior conhecimento do tema, que é de extrema importância para futuros trabalhos e aplicações em campo.

A metodologia do presente trabalho seguiu o fluxograma apresentado na Figura 1.

Figura 1. Fluxograma metodologia apresentada.



Fonte: Autoria própria (2019).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Auto cicatrização

O mecanismo de auto cicatrização pode acontecer de dois modos para todas as classes de materiais, (1) espontâneo, onde não há uma intervenção externa; e (2) não espontâneo, onde necessita de uma intervenção externa para que o mecanismo possa acontecer, geralmente temperatura e corrente elétrica (GHOSH, 2009).

O processo de auto cicatrização dos materiais está presente em todas as classes de materiais, sendo para algumas classes como polímeros, compósitos e cerâmicos estudos avançados e já utilizados no dia a dia. Para os metais os estudos são recentes, porém já com uma grande aceitação e tendência de crescimento para os próximos anos. Abaixo serão apresentados mecanismos para polímeros, compósitos, cerâmicas estruturais, concretos e materiais metálicos, como também mostrado esquemas de alguns mecanismos e seus resultados.

6.1.1 Auto cicatrização de materiais não metálicos

Polímeros e compósitos possuem uma gama de aplicações, por exemplo, automóveis, aeronaves, construção civil, esportes e eletrônicos. Entretanto, esses materiais são sensíveis a falhas mecânicas, químicas, térmicas, radiação ou até mesmo a combinação desses. Quando uma microtrinca se forma é quase impossível detectar e realizar uma reparação. Nos compósitos essas microtrincas podem levar a delaminação e perder suas propriedades (WU; MEURE; SOLOMON, 2008).

Nos polímeros, o desenvolvimento de trincas pode ocorrer por uma mudança estrutural de átomos e moléculas como a cisão de cadeias, bem como quando estão sujeitos a carregamentos. Essa falha pode acontecer em escalas microscópicas até de centímetros. Segundo relatado por Takeda et. al (2004, p.93 apud GHOSH, 2009, p.30), o material polimérico estudado, policarbonato, desenvolveu a temperaturas abaixo de 120°C uma capacidade de reverter e restaurar a região fraturada do polímero. No entanto nessa temperatura

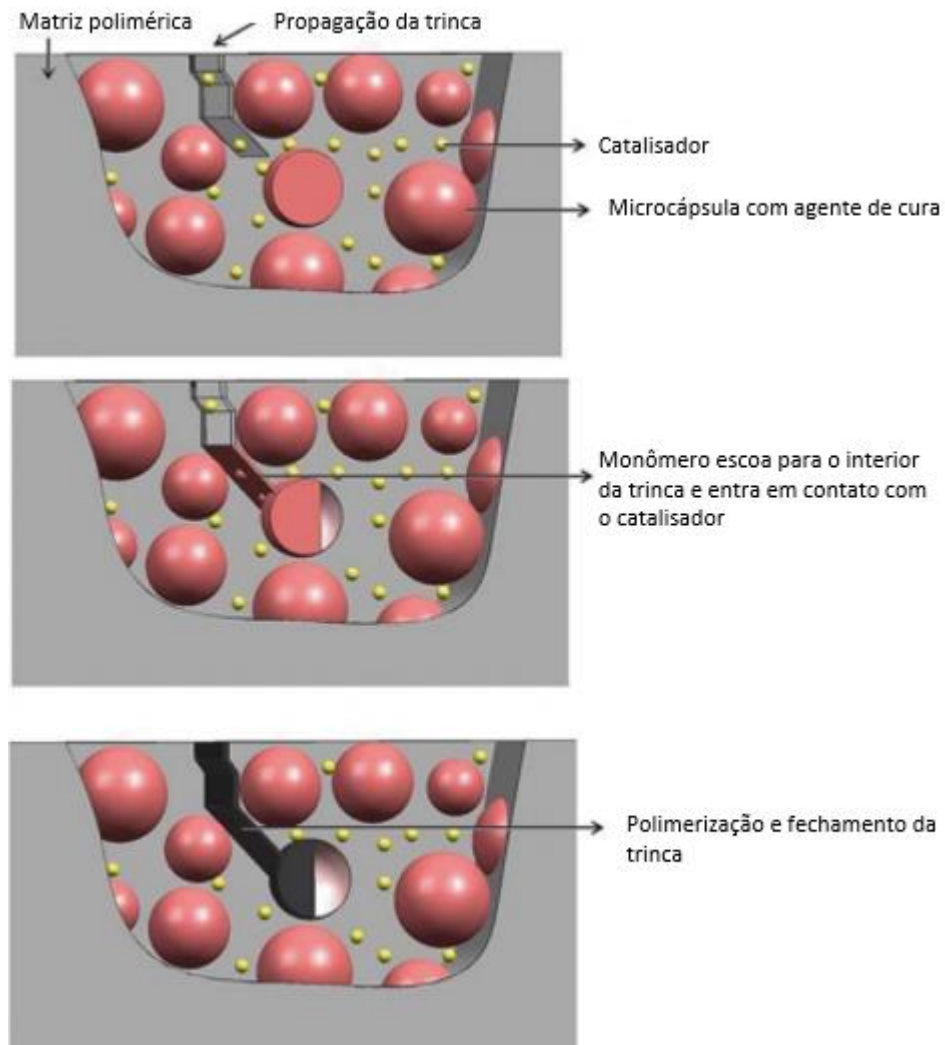
ocorria uma desconexão das ligações entre os monômeros, o que poderia levar a uma falha (GHOSH, 2009).

A auto cicatrização em materiais termoplásticos se dá por diferentes mecanismos, como interdifusão molecular, cicatrização por foto indução, recombinação de fim de cadeias, via ligações reversíveis, nanopartículas. Quando o mecanismo for a interdifusão, conforme estudado por Lin et al. (1990) e Wang et al. (1994), o PMMA (polimetilmetacrilato) tratado com metanol a temperaturas de 40 a 60°C pode ser um método eficaz para a cicatrização da trinca. Pois esse metanol resulta na diminuição da T_g do polímero e com isso promovia a difusão das cadeias do polímero até a interface da trinca, regenerando o material. O mecanismo de foto indução, consistiu na formação de uma estrutura que inicialmente ocorre em estado sólido evitando a formação e propagação da trinca, esse mecanismo é propiciado pela inserção de radiação ultravioleta e temperatura. A recombinação de fim de cadeia, ocorre em alguns tipos de materiais termoplásticos nas seguintes etapas: (1) quebra da cadeia por degradação, (2) difusão de oxigênio para a os polímeros, (3) recombinação da cadeia rompida com o oxigênio na presença de um catalisador cobre/amina e (4) eliminação água formada resultando na auto cicatrização. O mecanismo de ligação reversível pode ser aplicado em alternativa aos métodos que utilizam ultravioleta ou um catalisador para início do mecanismo de auto cicatrização, pois utilizam hidrogênio ou ligações iônicas para reparar o dano causado no polímero. Consiste na aplicação de organo-siloxanos e ionômeros na matriz. Essas promovem uma mobilidade da cadeia em temperaturas ambientes por adição de ligações na matriz do polímero. A técnica por nanopartículas é diferente das demais visto que não requer uma quebra das cadeias do polímero, pois consiste na introdução de fases particuladas dispersas para preencher a trinca e não ocorrer a falha (WU; MEURE; SOLOMON, 2008).

A auto cicatrização em materiais compósitos se dá por uma dissolução de catalisador e dicitlopentadieno envolto por uma microcápsula que é inserida na matriz do polímero, esse mecanismo apresenta resultados satisfatórios em condições de baixo carregamento para prevenção e retardação do crescimento de trincas de fadiga. Pode-se afirmar que, dependendo das condições de carregamentos que o material polimérico está sujeito, o mecanismo de auto cicatrização pode ser mais eficaz ou não. Sendo para baixos e moderados carregamentos, os mecanismos cinéticos de crescimento de trincas é a situação mais recomendada e que proporcionará maior vida de fadiga, porém se o mecanismo cinético da trinca for rápido, essa não tem tempo suficiente para inibir a propagação. A microcápsula é adicionada na matriz embebida pela solução de dicitlopentadieno, quando a trinca encontra essa microcápsula ela se rompe e inicia o processo de preenchimento da trinca realizando a reparação (JONES et al.,

2007; KESSLER; SOTTOS; WHITE, 2003; WU; MEURE; SOLOMON, 2008). A Figura 1, mostra como esse processo ocorre no interior dos materiais. No primeiro momento, tem-se a matriz polimérica já com o agente de cura e um catalisador em sua composição, no momento em que a trinca está se propagando pelo material e encontra o agente de cura encapsulado. Essa parede da microcápsula é rompida, e o agente de cura preenche toda a área da trinca juntamente com o catalisador. Para que o agente de cura faça seu papel e repare o material, é necessário que aconteça uma polimerização, ou seja, tanto o agente quanto a matriz devem ser compatíveis para que as ligações sejam estabelecidas e assim recupere totalmente o material.

Figura 2. Esquema mecanismo auto cicatrização em materiais compósitos por microcápsulas.

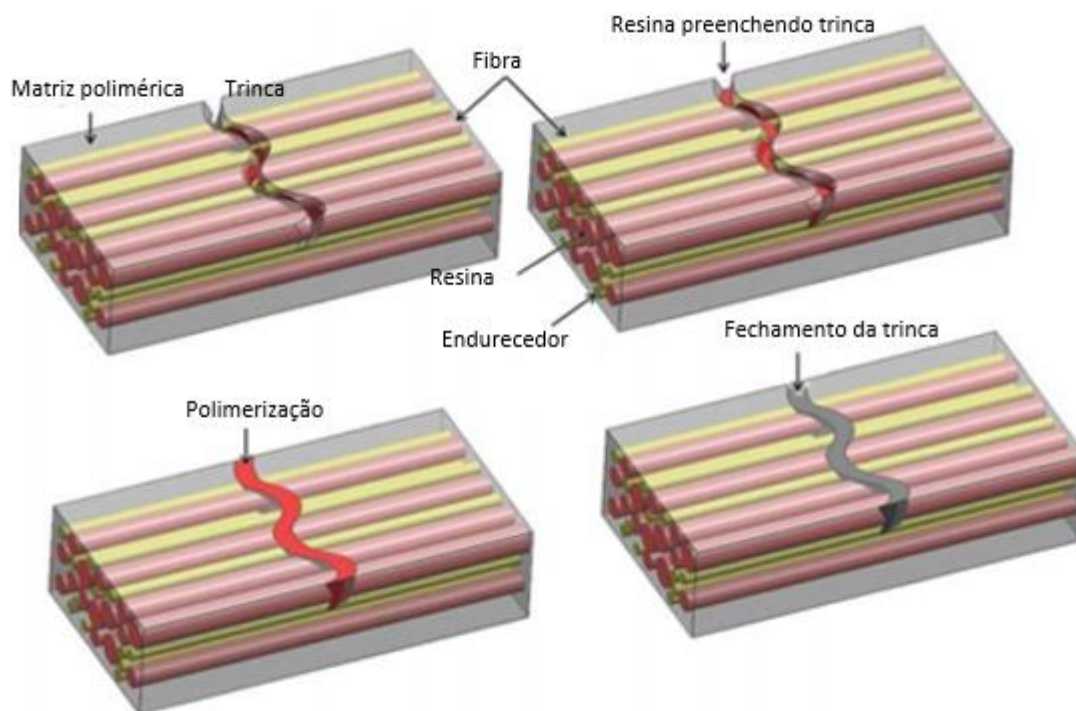


Fonte: Adaptado de Ghosh (2009).

Outro caso, é quando se é aplicado o agente de cura na região da trinca. A Figura 2 mostra como funciona esse processo quando o agente de cura é colocado externamente e não

no seu processamento. Esses dois processos para os materiais compósitos têm como semelhança a polimerização.

Figura 3. Esquema mecanismo auto cicatrização em materiais compósitos.



Fonte: Adaptado de Ghosh (2009).

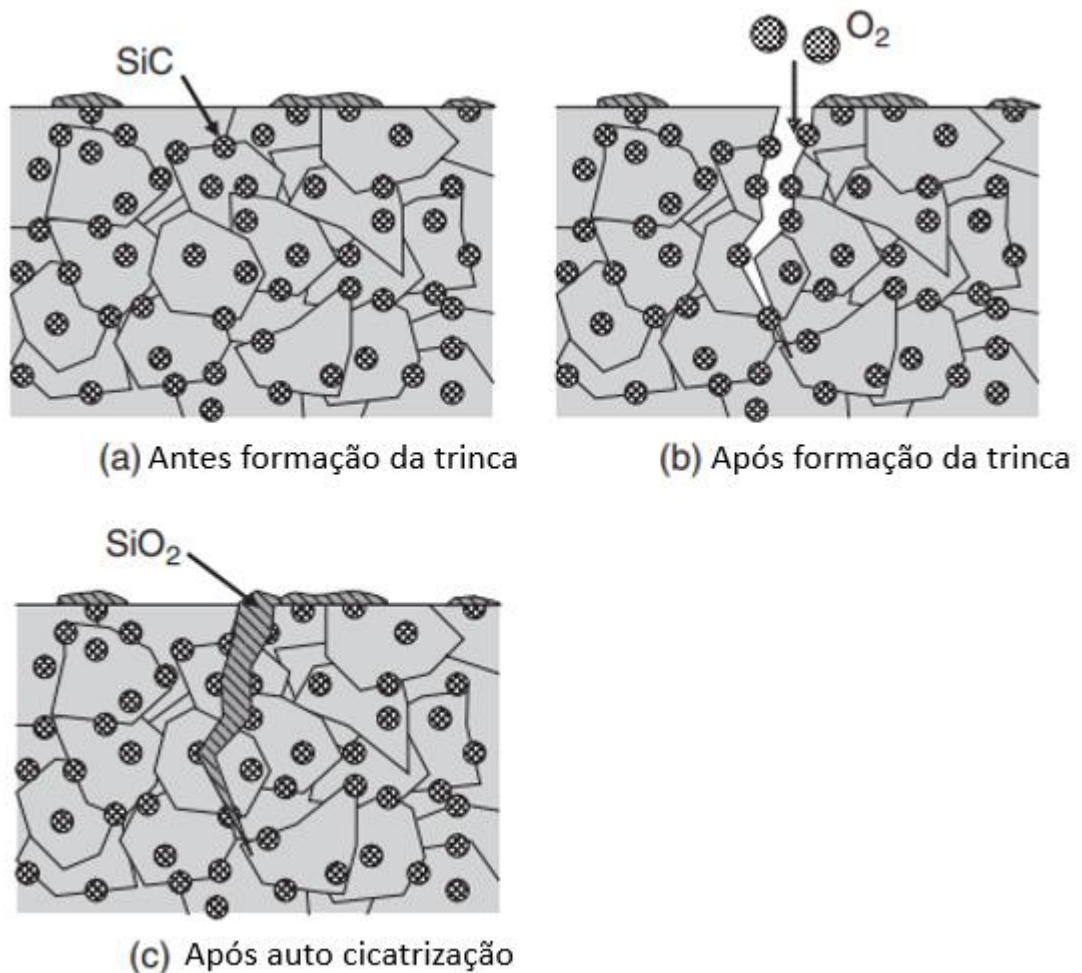
Em concretos, o fenômeno de auto cicatrização é conhecido a vários anos, com várias pesquisas mostrando a eficácia e a capacidade dos concretos em se auto regenerar. Mais tarde, foi observado que para um concreto com fissuras e submetido a um fluxo de água, o concreto diminui sua permeabilidade, levando a conclusão que houve um mecanismo que levou ao preenchimento da trinca. A principal causa do fechamento das trincas nos concretos é a formação de carbonato de cálcio, quando o cimento não hidratado e o dióxido de carbono presente na água ou ar reagem. Um outro caminho é a hidratação do cimento dentro das fendas e uma conseqüente aplicação de carga de compressão para o fechamento da trinca. O estudo desse mecanismo nos concretos é utilizado para aplicação em pontes, construção, levando a maior tempo de vida desse concreto e diminuindo custo com a redução de manutenção das estruturas (GHOSH, 2009).

O fenômeno de auto cicatrização nos materiais cerâmicos estruturais é dividido em três etapas: processo difusivo, relaxação da tensão residual no local da trinca e por último, a ligação por oxidação da trinca. Estudos com materiais contendo partículas de SiC mostram que, após o material iniciar uma trinca, partículas de oxigênio se depositam naquela região, reagindo

com o SiC e formando SiO₂, que será o responsável para que ocorra o preenchimento e reparação da região trincada. Nesse estudo, foram colocadas partículas de tamanhos diferentes e foi concluído que partículas de tamanho de 20 nm aumentam a velocidade de cicatrização do material quando comparadas a tamanhos de partículas de tamanho 270 nm, podendo também recuperar a uma menor temperatura. Esse estudo mostrou que esses tamanhos de partículas mantêm o nível de refratariedade do material, sendo notado que o tamanho de partículas de SiC é uma alternativa interessante para o mecanismo de auto cicatrização (GHOSH, 2009).

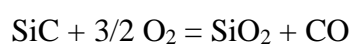
Na Figura 3 é mostrado o esquema do mecanismo de fechamento de trinca para as cerâmicas estruturais, no caso o SiC.

Figura 4. Esquema do mecanismo de auto cicatrização para materiais cerâmicos estruturais.



Fonte: Adaptado de Ghosh (2009).

A reação que ocorre nesse mecanismo de reparação da trinca no SiC é mostrada na equação 1.



Equação (1)

6.1.2 Auto cicatrização em ligas metálicas

Um dos modos de auto reparação dos defeitos em materiais metálicos, analisado para alumínio envelhecido, é feito com a formação de precipitados que se depositam nesses defeitos, que podem ser trincas ou vazios, impedindo que esse defeito se propague e leve a uma falha. Estes precipitados são dissolvidos na matriz e tendem a ter uma mobilidade reduzida mesmo em temperaturas próximas a temperatura de fusão. Isso explica o porquê que esse fenômeno é restringido aos metais que trabalham a temperaturas elevadas. O tamanho do defeito também deve ser analisado e levado em consideração, sendo defeitos nanométricos os mais eficazes a serem reparados, pois defeitos maiores requer um aumento rápido desses precipitados (CAVALCANTE, 2016).

Demkowicz e Xu (2013), por acidente foram os primeiros a descobrirem que os metais poderiam se auto cicatrizar se houvesse condições para isso. O estudo baseou-se na análise de uma trinca sob uma tensão mecânica em que pôde se observar que, ao invés dessa trinca se propagar, ela se reparava. Essa descoberta contradiz o que muitos cientistas pensam de acordo com os grãos formados nesses materiais. Para os cientistas, esses grãos seriam estáticos, o que daria essa resistência ao material. Com os resultados observados, a resposta para o sua descoberta era que os contornos de grãos migram para preencher a trinca microscópica. Porém, esse tipo de mecanismo não acontece em trincas que podem ser vistas a olho nu por exemplo, apenas para trincas de tamanhos microscópicas. No entanto, inúmeros casos de falhas catastróficas surgem a partir dessas trincas microscópicas (XU; DEMKOWICZ, 2013).

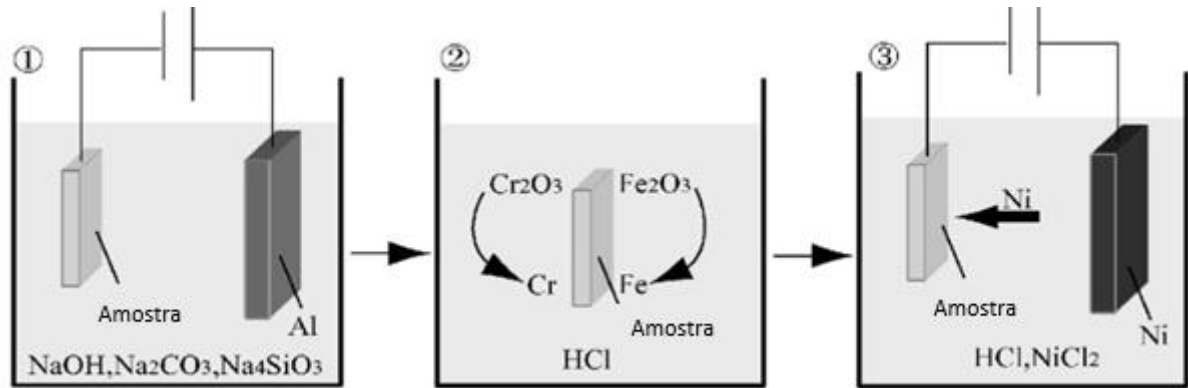
Zheng et. al (2013) demonstram em um de seus estudos o fechamento de uma trinca em ligas de níquel pelo processo de eletrocicatrização, onde a amostra foi embebida em uma solução de 100 g/L $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 200g/L $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e 40 g/L H_3BO_3 e submetida a uma temperatura de 40°C e uma densidade de corrente controlada de 4A/dm². O resultado desse estudo foi satisfatório, sendo comprovado por vários parâmetros o fechamento da trinca. Zheng et al (2015), em um outro estudo, propõe a diminuição de poros em uma superliga de níquel através do método de prensagem isostática a quente (ZHENG; SHI; LOU, 2013; ZHENG; SHI; LU, 2015).

Hosoi et. al (2013) estudou a cicatrização de um aço inoxidável pelo método de eletropulsão de alta densidade de corrente e superfície pré-ativada para que os átomos promovam a difusão e conseqüentemente o fechamento da trinca. Nesse estudo, um aço inoxidável austenítico SUS316 foi usado como amostra, sua composição é formada de C, Si,

Mn, P, S, Ni, Cr, Mo e Fe nas proporções de 0,05, 0,26, 1,3, 0,028, 0,03 , 10,1 , 17,09 , 2,01% em peso respectivamente. Inicialmente as amostras de aço inoxidável passaram por um processo de recozimento com o objetivo de retirar as tensões residuais oriundas do processo de usinagem para confecção dos corpos de prova. Para confecção da trinca, foi feito um teste de fadiga por tração na amostra após o tratamento térmico e em seguida foi iniciado o processo de ativação da superfície para que a região da trinca esteja em condições de se unir quando a corrente e a temperatura passar por aquela região, que irá fornecer condições favoráveis para a difusão e ligação dos átomos da região de estudo (HOSOI, 2013).

Esse processo de ativação da superfície realizado por Hosoi et. al (2013) foi realizado em três etapas, limpeza eletrolítica, ativação por HCl e recobrimento de Ni. Na etapa de limpeza eletrolítica o ânodo é ligado a uma amostra de Al e o cátodo na amostra onde uma densidade de corrente de 10 A/dm² por 60 s e a uma solução alcalina contendo 30 g/L NaOH, 30 g/L Na₂CO₃ e 30 g/L Na₄SiO₃ mantida por 333 K. Na ativação por HCl, a amostra ficou exposta por 10 s em HCl 37%, e finalmente o recobrimento por Ni acontece com a retirada da camada de óxido do processo anterior e um filme de Ni é formado na amostra com o objetivo de evitar a reoxidação. Para o recobrimento com o Ni, a composição da solução é 240 g/L NiCl₂ e 80 g/L com HCl 37%, a densidade de corrente foi de 10 A/dm² e mantida por 90 s. Esse processo foi realizado em duas amostras e uma terceira não foi realizado a fim de comparação. Após o processo de preparação das amostras, foi realizado o processo de eletropulsão para promover as condições necessárias para a cicatrização da trinca que foi realizado por uma fonte tipo transistor na faixa de 0,5 kA a 10 kA. A eletropulsão foi realizada com dois eletrodos com duração de pulso de 0,5 ms a 10 ms e foi observado pelo MEV as condições da trinca antes e depois da aplicação. Verificou-se após o fim do experimento que as trincas haviam sido reparadas e que para uma aplicação de 35 pulsos a adesão da trinca acontece mais eficaz que para aplicações de pulsos mais baixas. Na Figura 4 são mostradas as etapas de limpeza eletrolítica, ativação por HCl e recobrimento de Ni que antecedem a aplicação dos pulsos elétricos (HOSOI, 2013).

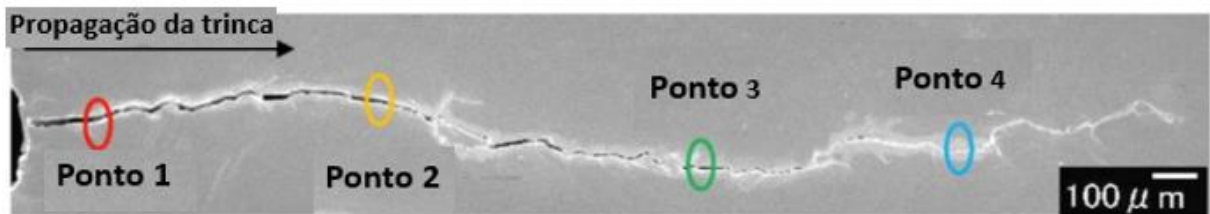
Figura 5. Etapas de ativação (1) Limpeza eletrolítica; (2) Ativação por HCl e (3) Recobrimento de Ni.



Fonte: Adaptado de Hosoi (2013).

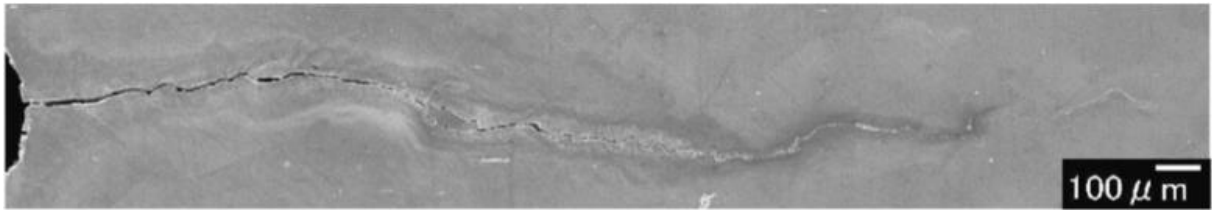
Nas Figuras 5, 6, 7 e 8 observa-se uma trinca de fadiga antes do processo de eletropulsão, e após 8 pulsos, 25 pulsos e 35 pulsos de corrente, respectivamente. É possível observar que com o aumento dos pulsos de corrente as trincas se fecham quase que na sua totalidade. Na Figura 9 tem-se uma comparação da mesma região antes e após os 35 pulsos de correntes, comprovando que o material se restituiu com a aplicação dos pulsos de correntes que provocaram um aumento de temperatura promovendo a difusão e posterior ligações dos átomos.

Figura 6. Trincas por fadiga antes do processo de aplicação de corrente por eletropulsão.



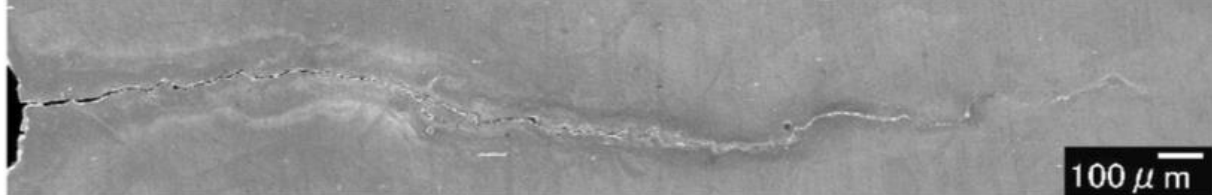
Fonte: Adaptado de Hosoi (2013).

Figura 7. Trincas por fadiga sendo fechadas após 8 aplicações de corrente por eletropulsão.



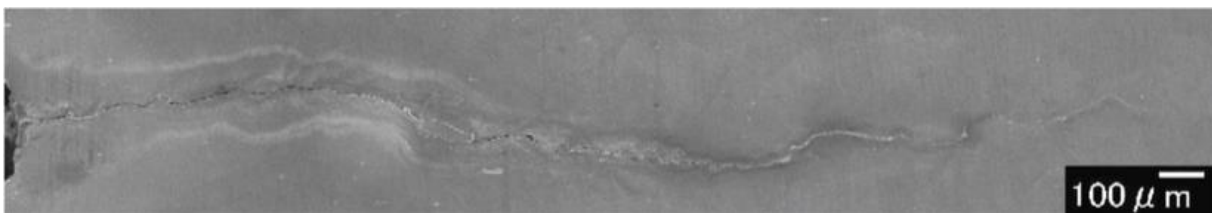
Fonte: Adaptado de Hosoi (2013).

Figura 8. Trincas por fadiga sendo fechadas após 25 aplicações de corrente por eletropulsão.



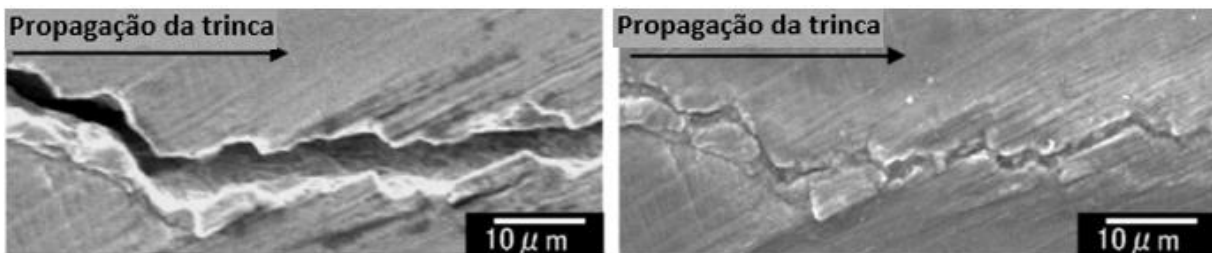
Fonte: Adaptado de Hosoi (2013).

Figura 9. Trincas por fadiga sendo fechadas após 35 aplicações de corrente por eletropulsão.



Fonte: Adaptado de Hosoi (2013).

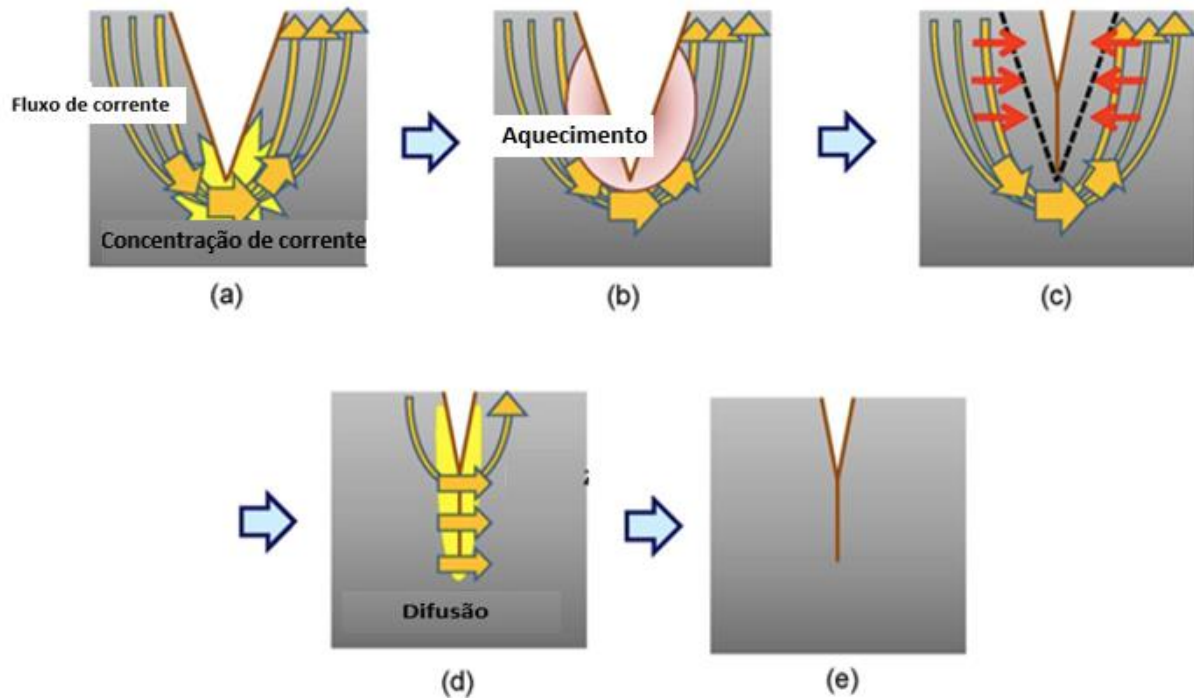
Figura 10. Comparação antes e após aplicação dos pulsos de correntes.



Fonte: Adaptado de Hosoi (2013).

Na Figura 10 é mostrado um esquema da sequência de acontecimentos que ocorrem no interior do material até que a trinca seja fechada, dando ênfase na concentração de corrente na peça que provoca um aquecimento por efeito Joule e causa a difusão e fechamento da trinca.

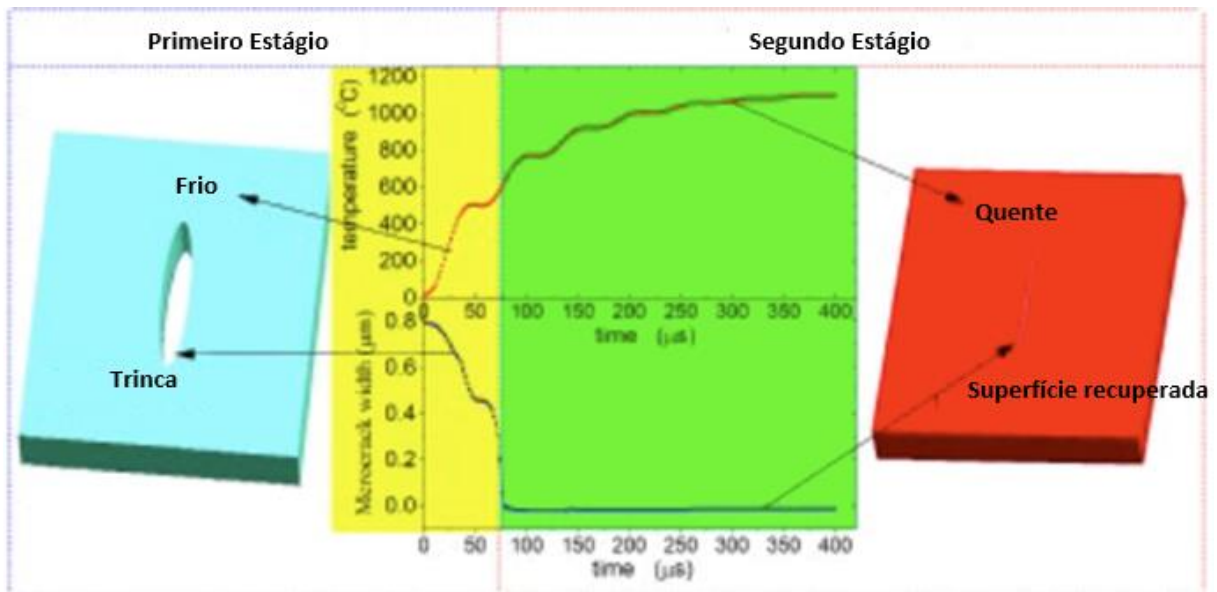
Figura 11. Modelo esquemático do processo de auto cicatrização por eletropulsão.



Fonte: Adaptado de Hosoi (2013).

Song et.al (2016) mostrou o comportamento da trinca por elementos finitos, simulando uma aplicação de eletropulsão em uma liga de titânio TC4 com espessura de 1,0 mm. Nessa amostra a trinca foi aberta com uma pré-carga, no equipamento universal de tração, formando trincas aleatórias pela amostra. Seus estudos mostram a relação de tamanho da microtrinca *versus* temperatura *versus* tempo, e seus resultados mostram que uma amostra de titânio sob um estímulo de eletropulsão por descarga de capacitores leva 82 μs para começar o fechamento da microtrinca. Entre 26 μs e 82 μs a temperatura aumenta Na medida que a fenda aberta é fechada pela ação da corrente e o calor. No momento em que o tempo do procedimento atinge 82 μs , a temperatura da amostra na região da trinca chega a 600°C e A superfície começa a se fechar, causando a auto cicatrização da amostra. Até um tempo de 400 μs , o tamanho da fenda se mantém constante enquanto que a temperatura continua a subir até aproximadamente 1100°C. Na Figura 11 é possível observar graficamente o tempo até que a trinca começa a cauterizar, relacionando a temperatura com o tamanho da trinca (SONG, 2016).

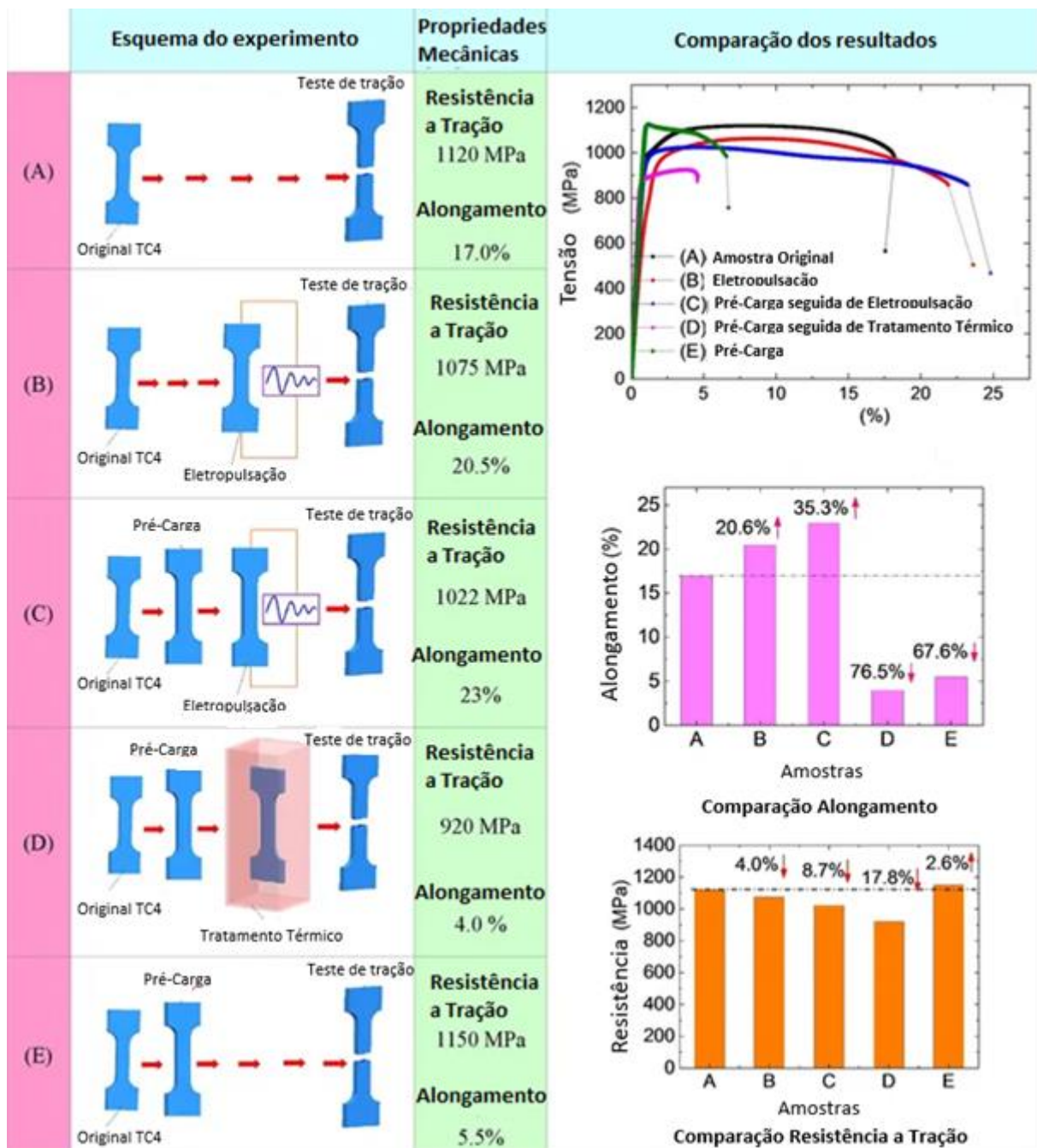
Figura 12. Gráfico de relação tempo vs temperatura vs tamanho da microtrinca.



Fonte: Adaptado de Song (2016).

Song et. al (2016) mostrou outros resultados no que diz respeito as propriedades mecânicas da amostra após a cicatrização do material, onde pode ser observado a influência do tratamento térmico, da eletropulsão e da pré-carga nos testes. Os resultados gráficos do ensaio tração realizado na amostra sem nenhum tratamento e sem nenhuma aplicação de eletropulsão sobre o material, assim para essa amostra verificou-se uma tensão máxima de 1120 MPa e deformação de 17,0%. Tomando como base de comparação esses resultados preliminares em uma amostra sem tratamento, foi realizado outros testes com mais 4 amostras, sendo elas: (A) Aplicação de eletropulsão antes do ensaio uniaxial, (B) Pré-carga seguida de eletropulsão, (C) Pré-carga seguida de tratamento térmico, e (D) Realizado pré-carga antes do ensaio. Para essas amostras. obteve os seguintes resultados: (A) Tensão máxima 1075 MPa e deformação de 20,5%; (B) Tensão Máxima 1022 MPa e deformação 23%; (C) Tensão Máxima 920 MPa e deformação 4,0%; e (D) Tensão Máxima 1150 MPa e deformação 5,5%. Percebe-se que a realização do processo de eletropulsão na amostra de liga de titânio TC4 mantém as propriedades mecânicas após o procedimento próximas a amostra original, e têm-se um aumento na deformação do material, tornando ele mais dúctil se compararmos com a amostra original e com a amostra que sofreu tratamento térmico, que teve um aumento de dureza oriundo do processo térmico, conforme visto na Figura 12. Isso mostra a eficácia desse método, podendo reutilizar a peça em alguma aplicação, desde que se enquadre nos requisitos de projeto (SONG, 2016).

Figura 13. Curva tensão x deformação e métodos de análises das amostras.



Fonte: Adaptado de Song (2016).

Outro estudo realizado para auto cicatrização foi elaborado por Michalcová et. al (2018), onde o objetivo foi estudar o mecanismo de auto cicatrização a partir da transformação de fase em uma liga Al-Ag. Para esse estudo foi utilizado uma amostra Al-Ag 30% em peso na realização dos testes. Michalcová *et. al* identificou num MET que as amostras, recozidas a 550°C por 1h, a precipitação de Ag₂Al na matriz Al CFC e que, a partir dessa temperatura, é possível promover o fechamento da trinca no interior do material. Abaixo dessa temperatura de

recozimento não foi possível observar essa precipitação e, conseqüentemente, não seria possível a auto cicatrização. Outra conclusão observada por Michalcová *et. al* foi de que só seria possível o fechamento se as partículas Ag_2Al na escala nano, se fosse incorporada a uma matriz de Al com boas propriedades mecânicas, com o objetivo de obter um material compósito e, assim, através da precipitação das partículas dispersas promover o mecanismo de cura nos materiais de matriz Al CFC (MICHALCOVÁ, 2018).

6.2 Relação: Tipo de material versus mecanismos auto cicatrização

Tendo em vista ao que foi apresentado no tópico anterior para todas as classes de materiais referente ao mecanismo de auto cicatrização nota-se que para os materiais metálicos, o maior desafio ainda é alcançar a viabilidade em larga escala devido ao tamanho dos átomos e a falta de direcionalidade das ligações. Por possuírem átomos maiores, a sua afinidade eletrônica é menor, por isso requer uma maior energia dispensada para que seja feito a ligação. Se compararmos com os polímeros, que possuem uma temperatura de fusão mais baixa, portanto menos energia, podemos explicar o porquê que as pesquisas são mais avançadas para os materiais poliméricos.

Outro fato que favorece tanto os materiais poliméricos quanto os cerâmicos em relação aos metais, quando à auto cicatrização, é a direcionalidade de ligações, pois, no casos dos cerâmicos, ao ser adicionado outro material que seja compatível com o material da matriz não será necessário uma energia alta para que ative essa interação, existindo até bactérias que com seu ciclo natural de sobrevivência podem realizar essa atividade.

Para os materiais metálicos, os resultados satisfatórios foram apenas com trincas microscópicas, mas que possuem uma extrema importância, porém é mais difícil de detecção, a menos que seja feito uma inspeção periódica no material.

Foi visto que os modos de cicatrização estudados são por meio de uma pressão de compressão contra a falha sob altas temperaturas, cicatrização por eletropulsão. Em todos esses casos são necessários uma energia de ativação para que favoreça a difusão dos átomos e promovam a ligação entre eles.

Este estudo tem como princípio auxiliar no desenvolvimento de uma metodologia para esse processo de cicatrização dos materiais com base em pesquisas já finalizadas para todas as classes de materiais. Dentre as possibilidades apresentadas nesse desenvolvimento, destaca-se

como melhor processo de cicatrização o método apresentado por Hosoi, onde temos uma ativação dos átomos por uma solução de HCl, para que na etapa seguinte o material numa solução contendo seu metal possa difundir para a região da trinca e com a ativação da corrente elétrica promover a ligação dessa região fraturada.

O grande desafio para a efetivação da aplicação dessas técnicas será em encontrar maneiras sustentáveis e viáveis para execução em peças de grande porte, pois com essa descoberta a substituição de peças fraturadas poderá ser postergado devido a possibilidade de manutenção de peças antes da troca, isso depois de uma análise quanto a complexidade e valor agregado da peça para aquele setor. Para isso necessitaria de um setor de manutenção especializado de análise e execução além de abrir novas perspectivas de trabalho no setor produtivo

Para exigências de maior responsabilidade onde se requer margens pequenas de fatores de segurança para tem um ganho de uma propriedade em relação a outra, por exemplo *resistência x peso*, esse método deverá ser aprofundado devido as alterações que podem causar na microestrutura e na diminuição de resistência mecânica após o processo de auto cicatrização.

7 CONCLUSÃO

Foi possível concluir, com a execução deste trabalho, que durante muitos anos o processo de auto cicatrização vem sendo estudado para os materiais de engenharia, sendo eles polímeros, cerâmicos e ou compósitos. Para os materiais metálicos ainda existem uma certa resistência pelos estudiosos devido as altas temperaturas necessárias para difusão e altas taxas de resistências que dificultariam os processos para os metais por meios das técnicas que já eram conhecidos para outras classes de materiais. No entanto, com o avanço da tecnologia e a necessidade de inovação para o mercado de materiais metálicos, as pesquisas começaram a surgir e com resultados favoráveis.

Para este trabalho, podemos tirar as seguintes conclusões, apresentadas em quatro tópicos:

1. Com os avanços tecnológicos das últimas décadas, a necessidade de melhorar os materiais existentes é de uma importância para a engenharia de materiais que dispõe de vários mecanismos e formas para isso acontecer. Assim, diminuir a extração dos metais da natureza, além de reduzir custos com processos de fabricação, têm-se um ganho em termos de sustentabilidade.

2. O conceito de auto cicatrização é recente quando se fala de ligas metálicas, porém, quando falamos de outros materiais de engenharia, como polímeros, cerâmicas e compósitos, esse conceito já é bastante difundido e atualmente são essenciais para o funcionamento desses materiais em alguma aplicação estrutural, que requer muita resistência e que tenha uma durabilidade. Essa durabilidade pode ser conseguida pelo mecanismo de auto cicatrização que retarda as falhas catastróficas oriundas de trincas por fadiga.

3. Para ligas metálicas, os estudos vêm mostrando resultados satisfatórios para alguns tipos de metais, como no caso do níquel, do aço inoxidável e do alumínio. Observa-se que esses materiais estão muito presentes em indústrias aeronáuticas, automobilísticas, aeroespacial dentre outras onde se requer leveza e resistência. Portanto, o investimento em pesquisas vem aumentando, pois uma substituição de uma peça por uma simples trinca que se forma internamente, ou na superfície, têm um custo enorme por parte das indústria, já que esta deve ser substituída ou reparadas devido a segurança dos usuários.

4. O fechamento da trinca nas ligas metálicas é um tanto quanto complexo quando comparada ao dos polímeros, isso ocorre pelo fato da temperatura de fusão ser bem maior e devido às forças de ligações entre os átomos. Muitas vezes, para os polímeros, um simples

aumento de temperatura com uma força pequena de compressão tem-se um material recuperado, fato que não acontece para os metais, pois a temperatura necessária para esse mecanismo acontecer é muito grande. Nos estudos apresentados, verifica que o procedimento de eletropulsção vêm sendo bem estudado e mostrado bons resultados, resultados esses devido ao efeito Joule na peça onde há um aumento na temperatura e que promove a difusão pela passagem de corrente elétrica.

8 TRABALHOS FUTUROS

As pesquisas com o tema auto cicatrização em materiais metálicos estão voltadas aos materiais inoxidáveis, níquel e são raras as pesquisas com alumínio, porém não se encontram pesquisas para os aços carbono e suas ligas. Como sugestão para futuras pesquisas relacionadas ao tema, propõe-se um estudo mais apurado para esses materiais devido sua importância e o grande consumo desse material nas diversas aplicações.

O fato desse mecanismo atualmente ser estudado em trincas microscópicas faz com que a detecção seja feita previamente antes de acontecer a falha catastrófica. Propõe-se então estudar uma forma de que esse mecanismo aconteça em trincas macroscópicas podendo, assim, evitar substituições prematuras do material, garantindo menor custos de reparos.

REFERÊNCIAS

- ASM HANDBOOK. ASM handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. **Technology**, v. 2, p. 3470, 2001.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 8ª edição ed. [s.l.] LTC, 2012.
- CASTRO, JAIME; MEGGIOLARO, M. A. **Fadiga: Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- CAVALCANTE, F. F. Comportamento Mecânico e Tenacidade à Fratura de Ligas de Alumínio 2024 e 7075 Submetidas a Diferentes Tempos de Envelhecimento. 2016.
- DA SILVA, A.C.F; HOMEM, P.M. LIGAS METÁLICAS: Investigação e Conservação. Secção de Museologia, Dpto Ciências e Técnicas do Patrimônio, Universidade do Porto, p.15 - 28, 2008.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - Aplicações e preparação de amostras - Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores. **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**, p. 60, 2007.
- DUARTE, L. DA C. et al. Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varreura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no estudo de Gemas: exemplos brasileiros. **The Journal of biological chemistry**, v. 30, n. 2, p. 3–15, 2003.
- GALLETI, S. Introdução à microscopia eletrônica. **Biológico, São Paulo**, p. 33–35, 2003.
- GHOSH, S. K. Self-healing Materials : Fundamentals , Design Strategies , and Applications. 2009.
- HOSOI, Atsushi; KISHI, Tomoya; JU, Yang. **Healing of Fatigue Crack by High-Density Electropulsing in Austenitic Stainless Steel Treated with the Surface-Activated Pre-Coating**. Nagoya: Materials, 2013. 13 p.
- JAMBO, M; FOFANO, S. **Corrosão: Fundamentos, monitoração e controle**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.
- JONES, A. S. et al. Life extension of self-healing polymers with rapidly growing fatigue cracks. **Journal of The Royal Society Interface**, v. 4, n. 13, p. 395–403, 2007.
- KESSLER, M. R.; SOTTOS, N. R.; WHITE, S. R. Self-healing structural composite materials. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 34, n. 8, p. 743–753, 2003.
- LIN, C.B, LEE, S.B, LIU, K.S. **Methanol-induced crack healing in poly(methyl methacrylate)**. *Polymer Engineering and Science*;30:1399–406, 1990.
- MICHALCOVÁ, Alena et al. **Phase Transformation Induced Self-Healing Behavior of Al-Ag Alloy**. Prague: Materials, 2018. 6 p.

REN, J. G. et al. Analysis and modeling of friction stir processing-based crack repairing in 2024 aluminum alloy. **Acta Metallurgica Sinica (English Letters)**, v. 30, n. 3, p. 228–237, 2017.

ROSA, E. **Análise de Resistência Mecânica de Peças e Componentes Estruturais - Mecânica da Fratura e Fadiga**. 1ª edição. Santa Catarina, Grante, 2002.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 6ª edição ed. São Paulo: Pearson, 2008.

DOWNLING, N.E. **Mechanical oh Behavior of Materials: Engineering Methods of Deformation, Fracture and Fatigue**. 4ª edição. Virginia: Pearson, 2012.

SONG, Hui et al. **Self-healing of damage inside metals triggered by electropulsing stimuli**. China: Scientific Reports, 2016. 11 p.

TAKEDA, K., UNNO, H. and ZHANG, M. **Polymer reaction in polycarbonate with Na₂CO₃**. Journal of Applied Polymer Science, 93, 920–26, 2004

VASCONCELOS, P. G. **Uma contribuição para a auto-reparação de aços em serviço**. [s.l.] Faculdade Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, 2011.

WANG, P.P; LEE, S; HARMON, J.P. **Ethanol-induced crack healing in poly(methyl methacrylate)**. Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics;32:1217–27, 1994.

WU, D. Y.; MEURE, S.; SOLOMON, D. Self-healing polymeric materials: A review of recent developments. **Progress in Polymer Science**, v. 33, n. 5, p. 479–522, 2008.

XIN, R. et al. Restoration of impact properties of internal crack healing in a low carbon steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 682, n. September 2016, p. 433–440, 2017.

XU, G. Q.; DEMKOWICZ, M. J. Healing of nanocracks by disclinations. **Physical Review Letters**, v. 111, n. 14, 2013.

ZHENG, X. G.; SHI, Y. N.; LOU, L. H. Healing Process of Casting Pores in a Ni-based Superalloy by Hot Isostatic Pressing. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 31, n. 11, p. 1151–1157, 2015.

ZHENG, X. G.; SHI, Y. N.; LU, K. Electro-healing cracks in nickel. **Materials Science and Engineering A**, v. 561, p. 52–59, 2013.