

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Lucas Cenci Aragão

**AVALIAÇÃO DE *INDUCTION HEALING* ATRAVÉS DE
AQUECIMENTO INDUZIDO EM MISTURAS ASFÁLTICAS
COM ADIÇÃO DE FIBRAS METÁLICAS**

Porto Alegre

julho 2019

LUCAS CENCI ARAGÃO

**AVALIAÇÃO DE *INDUCTION HEALING* ATRAVÉS DE
AQUECIMENTO INDUZIDO EM MISTURAS ASFÁLTICAS
COM ADIÇÃO DE FIBRAS METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Lélío Antônio Teixeira Brito

Coorientadora: Gracieli Bordin Colpo

Porto Alegre

julho 2019

LUCAS CENCI ARAGÃO

**AVALIAÇÃO DE *INDUCTION HEALING* ATRAVÉS DE
AQUECIMENTO INDUZIDO EM MISTURAS ASFÁLTICAS
COM ADIÇÃO DE FIBRAS METÁLICAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito (UFRGS)

PhD. pela University of Nottingham
Orientador

Prof.^a Gracieli Bordin Colpo (PUCRS)

Msc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coorientadora

Prof.^a Mônica Regina Garcez (UFRGS)

Dr.^a pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha família, em especial
ao meu pai (*in memoriam*), que sempre me deram
suporte para seguir adiante e estão sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar agradecendo à minha família e amigos, tanto do Rio Grande do Sul quanto da Bahia, pelo suporte ao longo de toda minha mudança a Porto Alegre, adaptação e decorrer da graduação, sempre me ajudando e dando todo apoio nos momentos mais duros que enfrentei.

Ao Prof. e orientador Lélío, por sempre me auxiliar nas dúvidas e incertezas que surgiram durante o trabalho, assim como pela orientação e disposição em ajudar nos trâmites necessários para conseguir equipamentos para esta pesquisa, pela confiança e comprometimento com o a pesquisa e com o LAPAV.

Ao Prof. Ceratti por coordenar com grande maestria o LAPAV e pelo exemplo a ser seguido no âmbito da pavimentação asfáltica.

Aos pesquisadores e à família LAPAV que me receberam de braços abertos desde o início da graduação, me ensinando desde a separação de materiais até a realizar ensaios na MTS, e que me ajudaram para que este trabalho fosse concluído: Débora, Eng.^a Marlova, Mateus, Seu Armando, Natália, Douglas E., Daniel, Vinicius, Douglas M., Larissa M., Caroline, Maria Bernadette, Felipe P., Guilherme, William.

Ao Prof. Washington pelo entusiasmo e por ser um grande incentivador de pesquisas, tanto no LAPAV quanto no LAGEO, e pelo belo trabalho como professor da universidade.

À engenheira Gracieli, minha coorientadora, por compartilhar seu imenso conhecimento e experiência sobre como realizar pesquisa científica e por estar disponível quando eu precisava.

À engenheira Luiza, por me dar apoio, incentivar e tirar minhas dúvidas quando elas surgiam sobre todo o procedimento de ensaio SCB.

À pesquisadora e amiga Eduarda, por ter me acompanhado ao longo dessa pesquisa.

À engenheira Mônica Garcez, por estar à frente do projeto da pesquisa de adição de limalha de aço em misturas asfálticas.

À toda equipe da Ecoplan Engenharia, por me receberem tão bem e estarem sempre dispostos a passar as novas tarefas. Ao chefe Rodrigo Malysz pela cautela em ensinar seus conhecimentos e por permitir flexibilidade para conciliar a graduação com o estágio.

Ao Prof. Campagnolo, coordenador do LEME, por se dispor a ajudar emprestando a câmera termográfica que permitiu aprofundar ainda mais este trabalho.

Ao Prof. Regis Amaral, engenheiro e pesquisador do Laboratório de Fundição (LAFUN), o qual estabeleceu contato com a indústria que possuía o equipamento essencial para esta pesquisa.

Ao Eng. Mozart e ao Douglas, da INPEL, por disponibilizarem tempo e permitirem que eu usasse a indutora, equipamento chave deste trabalho.

Aos amigos e companheiros Giovanna, André, João, Jéssica, Fábio, Guilherme, Priscila, Racquel, Gabriela, e demais que me acompanham nesta jornada chamada vida.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.

Leonardo da Vinci

RESUMO

Este trabalho é um estudo da avaliação do processo de indução de regeneração de mistura asfáltica, também chamado de *induction healing*. O concreto asfáltico por si só possui a capacidade de recuperar sua resistência, porém para que isso seja possível, é necessário permitir que o pavimento seja submetido a longos períodos de descanso, e também que este não esteja submetido a baixas temperaturas. Tendo em vista que, sob maiores temperaturas comparadas à temperatura ambiente o ligante asfáltico apresenta-se menos viscoso, foi idealizado que a indução do seu aquecimento poderia favorecer que este material cicatrizasse trincas geradas durante um processo de fadiga. Com o intuito de acelerar o processo de aquecimento e consequentemente de regeneração, foi criado o procedimento de adicionar partículas condutoras de corrente elétrica à mistura asfáltica, que poderiam ser aquecidas ao serem submetidas a um campo magnético gerado por uma indutora. Neste trabalho, foi avaliada uma mistura asfáltica com adição de 10% de fibras de aço em relação ao peso do ligante originadas de processo de fabricação de instrumentos de cutelaria. Como existem várias maneiras de medição de resistência de uma mistura asfáltica, optou-se por realizar a análise da capacidade de fechamento de fissuras e regeneração do concreto asfáltico por meio do ensaio de flexão em amostra semicircular com fenda (*semi-circular bending test – SCB*) com modo de carregamento monotônico. Foi analisada uma única mistura, porém com dois critérios para ser aplicado o aquecimento induzido das fibras. O primeiro consistiu em interromper o carregamento das amostras quando a resistência registrada decaísse em 20% da carga de pico registrada, e no segundo critério os corpos de prova (CP) foram levados à ruptura total. O intuito de utilizar dois critérios de parada do ensaio se deu devido a necessidade de realizar uma comparação entre o potencial de cura quando a intervenção fosse aplicada de maneira preventiva e a outra de maneira corretiva. Ademais da análise da resistência à propagação da fissura, foi analisada a evolução do aquecimento em relação ao tempo de indução. Ao analisar os resultados obtidos percebeu-se que o *induction healing* aplicado antes do rompimento total das amostras se mostrou mais eficaz, uma vez que a resistência máxima regenerada foi maior para o primeiro critério descrito. Os corpos de prova apontaram para uma maior ductilidade da mistura asfáltica após o aquecimento para ambos os critérios.

Palavras-chave: *Induction healing*. Regeneração asfáltica. Aquecimento induzido.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de delineamento.....	23
Figura 2 – Sistema de indução eletromagnética em misturas asfálticas.....	27
Figura 3 – Esquema do processo de induction-healing.	28
Figura 4 – Influência da quantidade de fibras em uma mistura asfáltica contendo areia para alcances de diferentes temperaturas.	29
Figura 5 – Influência da quantidade e formato de aço incorporado a misturas asfálticas para a condutividade elétrica.....	30
Figura 6 – Esquema de propriedades possíveis de serem estudadas através de ensaios SCB..	31
Figura 7 – Esquema de obtenção de amostras semicirculares a partir de um CP <i>Superpave</i> ...	32
Figura 8 – Esquema de funcionamento do ensaio SCB.....	33
Figura 9 – Equipamento utilizado para determinar a validação do ensaio SCB.	34
Figura 10 – Gráfico com alcance de carregamento máximo antes e depois do <i>induction healing</i>	36
Figura 11 – Curva força vs. deslocamento originada pelo ensaio SCB.	37
Figura 12 – Plano experimental.....	41
Figura 13 – Curva granulométrica dos agregados.....	45
Figura 14 – Micrografia da limalha de aço utilizada na mistura com aproximação de 100x e 5000x, respectivamente.	47
Figura 15 – Resultados de Resistência à Tração para mistura de referência e mistura com adição de 10% de limalha de aço.....	48
Figura 16 – Resultados de Módulo de Resiliência para mistura de referência e mistura com adição de 10% de limalha de aço.	49
Figura 17 – (a) Peneiramento da limalha; (b) Materiais secos dentro da cuba aquecida.	50
Figura 18 – (a) Mistura pronta para ser aquecida por período de envelhecimento; (b) Colocação de mistura no molde após envelhecimento; (c) Amostra extraída do molde já compactada por meio do CGS;	51

Figura 19 – Determinação do volume de vazios.	52
Figura 20 – Processo de serragem para obtenção das amostras semicirculares.	53
Figura 21 – Amostra semicircular pronta.	54
Figura 22 – Procedimento de montagem no ensaio SCB.	55
Figura 23 – Amostra envolvida por fita crepe após ruptura.	56
Figura 24 – Sistema de aquecimento indutivo.	57
Figura 25 – Amostra durante aquecimento com temperatura controlada com auxílio de câmara termográfica.	58
Figura 26 – Representação da evolução da temperatura ao longo do tempo de aquecimento para uma potência de 195 kW.	60
Figura 27 – Amostras aquecidas à temperatura máxima estipulada.	61
Figura 28 – Curvas Força vs. Deslocamento antes e depois de induzido o aquecimento para o primeiro critério de aplicação do <i>healing</i>	65
Figura 29 – Curvas Força vs. Deslocamento antes e depois de induzido o aquecimento para o segundo critério de aplicação do <i>healing</i>	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões da amostra semicircular para o ensaio SCB segundo a norma EN 12697-44 (2010).	33
Tabela 2 – Ensaios de aceitação do agregado.....	44
Tabela 3 – Características do material.....	44
Tabela 4 – Composição granulométrica dos agregados.	45
Tabela 5 – Propriedades do ligante asfáltico CAP50/70 e especificações ANP (2005).....	46
Tabela 6 – Composição Química do resíduo.....	47
Tabela 7 – Características da mistura com adição de 10% de limalha de aço em relação ao peso do ligante.	48
Tabela 8 – Resultados dos volumes de vazios obtidos na moldagem	59
Tabela 9 – Tempo de aquecimento e temperaturas máximas atingidas por cada amostra ensaiada.	61
Tabela 10 – Força máxima alcançada antes e depois do aquecimento em amostras no ensaio SCB interrompido em 20% a menos da carga máxima obtida e eficiência do <i>healing</i> nesta condição.....	63
Tabela 11 – Força máxima alcançada antes e depois do aquecimento em amostras com ruptura levadas até o limite de sua capacidade de resistência no ensaio SCB e eficiência do <i>healing</i> nesta condição.....	63
Tabela 12 – Comparação de <i>healing</i> médio.....	64
Tabela 13 – Resultados dos parâmetros calculados para aplicação do <i>healing</i> quando $F_{máx}$. 66	
Tabela 14 – Resultados dos parâmetros calculados para aplicação do <i>healing</i> quando $F_{máx}$ atingiu aproximadamente 0,1 kN.....	68
Tabela 15 – Resultados de $ m $ e FI obtidos pelo ensaio SCB.	69

LISTA DE SIGLAS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ANP: Agência Nacional do Petróleo

CAP: Cimento asfáltico de petróleo

CGS: Compactador Giratório *Superpave*

CP: corpo de prova

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

IST: Índice de Susceptibilidade Térmica

LPAV: Laboratório de Pavimentação

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

MR: módulo de resiliência

MTS: *Material Test System*

RP: *rest period*

RT: compressão diametral

SCB: *Semi-circular bending*

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

a: altura do entalhe

A: área

A_{lig} : área de ligamento

Al: Alumínio

Cr: Cromo

D_i : diâmetro da amostra “i”

$\varepsilon_{máx,i}$: deformação correspondente à máxima força da amostra “i”

e: espessura da amostra

f: frequência

$F_{máx,i}$: Força máxima da amostra “i”

F0: carga máxima alcançada pela mistura asfáltica antes da indução eletromagnética

Fa: carga máxima alcançada depois da indução da cura

Fe: Ferro

FI: índice de flexibilidade

G_f : energia de fratura

h: altura da amostra

H: intensidade do campo magnético

I: corrente elétrica

k: quilo

|m|: valor absoluto da inclinação da reta

mm: milímetro

Mn: Manganês

N: Newton

°C: grau Celsius

‰: por cento

P: potência

R: resistência elétrica

$\sigma_{m\acute{a}x}$: máxima tensão

seg: segundos

Sh: nível de cura

Si: Silício

T_{máx}: temperatura máxima

t_i : espessura da amostra

U_{ind} : força eletromotriz

V: volts

Vv: volume de vazios

μ : permeabilidade magnética

μm : micrômetro

W: Watt

ΔW_i : deformação vertical máxima

W_f : trabalho de fratura

W_i : altura da amostra

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....	20
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA.....	20
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	20
2.2.1 Objetivo Geral	20
2.2.2 Objetivos Específicos.....	20
2.3 PRESSUPOSTO.....	21
2.4 DELIMITAÇÕES.....	21
2.5 LIMITAÇÕES	22
2.6 DELINEAMENTO.....	22
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1 O INDUCTION HEALING EM MISTURAS ASFÁLTICAS.....	25
3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O INDUCTION HEALING EM MISTURAS ASFÁLTICAS	28
3.2.1 Ensaio SCB.....	31
3.2.1.1 NORMA EUROPEIA EN 12697-44 (2010).....	33
3.2.1.2 NORMA AMERICANA AASHTO TP105 (2013)	36
3.3 INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE FIBRAS METÁLICAS	39
4 PLANO EXPERIMENTAL	41
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
5.1 MATERIAIS	43
5.1.1 Agregados.....	43
5.1.2 Ligante asfáltico.....	45
5.1.3 Fibras de aço	46
5.1.4 Características da mistura.....	47
5.2 MÉTODOS.....	49
5.2.1 Produção da mistura e moldagem das amostras	49
5.2.2 Determinação do Volume de Vazios (Vv).....	52
5.2.3 Fabricação das amostras semicirculares	52
5.2.4 Ensaio de fratura em amostras semicirculares.....	54
5.2.5 Indução do aquecimento	56
6 ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....	59

6.1 VOLUME DE VAZIOS	59
6.2 TEMPERATURAS ALCANÇADAS	59
6.3 HEALING POR COMPARAÇÃO COM $F_{m\acute{a}x}$	62
6.4 RESULTADOS SCB.....	64
7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
7.1 CONCLUSÕES	70
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE A – RELATÓRIO DE EVOLUÇÃO DE AQUECIMENTO.....	77
APÊNDICE B – RELATÓRIO DE IMAGENS TERMOGRÁFICAS DE AMOSTRAS AQUECIDAS	86

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o modal de transportes se mostra em sua grande maioria sendo composto pelo meio rodoviário. O Plano Rodoviário Nacional, criado em 1944, foi o primeiro plano rodoviário aprovado pelo Governo Federal que pretendia fundamentalmente ligar o país de Norte a Sul e estabelecia os princípios gerais da política administrativa rodoviária. Junto a ele, outros projetos foram criados posteriormente a partir da década de 1940 com o objetivo de incentivar o transporte através das rodovias (Transportes no Brasil - Síntese Histórica, Ministério dos Transportes).

O concreto asfáltico, o qual compõe grande parte da malha rodoviária brasileira, é constituído, basicamente, por ligante asfáltico, agregados de diferentes granulometrias e volume de vazios. Essa camada de revestimento tem por objetivo garantir, dentre outros parâmetros, resistência à fadiga e ao trincamento ocasionado devido as altas solicitações geradas pelo tráfego de cargas.

Além de reduzir significativamente a resistência do revestimento asfáltico, o aparecimento de trincas pode permitir que ocorra percolação de água por entre elas, afetando também as demais camadas que compõem a estrutura do pavimento e, conseqüentemente, acaba-se por reduzir a vida útil deste. Para evitar que ocorra essa redução, é indicado que hajam métodos de restauração que evitem a propagação excessiva das trincas.

Atualmente existem diversos métodos de restauração de pavimentos, caso o problema se encontre no revestimento, catálogos do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER) e/ou Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) indicam soluções as quais o concreto asfáltico existente seja descartado e reconstruído ou necessite execução de camada de reforço, mas nunca considerando que possa haver recuperação de sua resistência.

Estudos desde a década de 1960 mostram a capacidade de auto-recuperação de misturas asfálticas após sofrerem longos períodos de descanso (BAZIN e SAUNIER, 1967). Bazin e Saunier (1967) observaram em sua pesquisa que as amostras prismáticas ensaiadas poderiam se recuperar até 90% da resistência original quando submetidas a um carregamento uniaxial, quando fosse permitido período de descanso (*rest period*, RP) a uma temperatura de 25°C.

O maior problema para proporcionar a auto-recuperação do concreto asfáltico reside na necessidade de interrupção do tráfego de veículos para que a mistura descanse por um período

satisfatoriamente longo. Considerando que o transporte de cargas pelas rodovias brasileiras é o maior dentre as demais modalidades, se torna inviável promover a auto-recuperação de misturas asfálticas no Brasil.

A partir da ideia de reduzir o tempo de recuperação do revestimento asfáltico, foi proposto adicionar (...) partículas condutoras à mistura asfáltica com o objetivo de aquecê-las por meio de indução eletromagnética (GARCÍA *et al.*, 2011), surgindo assim o processo de cura induzida (ou *induction healing*).

A proposta deste trabalho foi avaliar a recuperação da resistência do concreto asfáltico com fibras de aço em seu interior, após atingir o estado de ruptura, através da indução de seu aquecimento por meio de fornecimento de energia eletromagnética.

No primeiro capítulo é apresentada uma breve contextualização sobre o surgimento do *induction healing* e as vantagens de empregá-lo como solução de restauração de revestimentos asfálticos.

Posteriormente, no segundo capítulo, serão apresentadas as diretrizes do trabalho, juntamente com a questão da pesquisa, os objetivos gerais e específicos, pressupostos, limitações e delineamento.

Na terceira parte do trabalho, será realizada uma revisão bibliográfica com os princípios básicos englobados no processo da cura induzida através do aquecimento por indução eletromagnética e as características que uma mistura com adição de fibras metálicas pode apresentar. Da mesma forma, haverá uma breve descrição do ensaio selecionado para realização da avaliação do *induction healing*, que é o ensaio em amostras semicirculares (SCB), o qual é caracterizado por indução de propagação de fissura por um entalhe na parte inferior das amostras.

No quarto capítulo será descrito o programa experimental, englobando os materiais utilizados nas misturas asfálticas produzidas assim como os procedimentos de ensaios utilizados para avaliar a recuperação do concreto asfáltico.

No quinto capítulo serão apresentados os resultados originados nos ensaios realizados para avaliação do *induction healing* e posteriormente as conclusões da pesquisa. Por fim, serão realizadas sugestões para realização de trabalhos futuros.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

O método de investigação deste trabalho está baseado no problema de pesquisa, objetivos principais e secundários, pressupostos, premissas, delimitações e na descrição das etapas deste trabalho.

2.1 QUESTÃO DA PESQUISA

Qual o comportamento de um concreto asfáltico que contém 10% de fibras metálicas em relação à massa de ligante incorporadas à sua composição submetido ao ensaio SCB, antes e depois de induzir sua cura através de aquecimento pelo fornecimento de energia eletromagnética?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos desta pesquisa estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos, os quais serão descritos na sequência.

2.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é verificar o potencial de recuperação da resistência de uma mistura asfáltica com a utilização de fibras de aço oriundas de resíduo de processo industrial de fabricação de ferramentas de cutelaria, também chamada limalha de aço, por meio aquecimento por indução eletromagnética após atingida a carga máxima de resistência da mistura.

2.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar a taxa de ganho de temperatura em relação ao tempo de indução das amostras;
- Avaliar a recuperação de uma dada mistura asfáltica por meio de comparação entre parâmetros obtidos no ensaio de rompimento de amostras semicirculares com fenda antes e depois do aquecimento induzido;

- Comparar a resistência máxima alcançada pela mistura com e sem a limalha de aço, para verificar se houve perda deste parâmetro ao incorporar o resíduo do processo industrial;
- Comparar os resultados calculados entre a indução do aquecimento quanto ao rompimento parcial e ao rompimento total das amostras ensaiadas.

2.3 PRESSUPOSTO

Em altas temperaturas, a cura de uma fissura em concreto asfáltico ocorre devido ao retorno da estrutura do betume de um sol a um gel. Caso fosse possível permitir que a camada de rolamento da estrutura do pavimento não sofresse carregamento devido a aplicação de cargas com a passagem de veículos, e caso haja temperaturas mais elevadas e interrupção de tráfego, os danos ali presentes poderiam ser recuperados (LIU *et al.*, 2010). Em baixas temperaturas, períodos de descanso não permitem que os danos estruturais criados pelos ciclos de carga sejam “curados” e a recuperação natural do pavimento será apenas parcial (CASTRO M., *et al.*, 2006). Partindo deste pressuposto, através do aquecimento do asfalto presente na mistura por meio de fornecimento de energia a um material condutor contido em uma dada mistura asfáltica por um determinado período, o processo de auto-recuperação do revestimento pode ocorrer em um menor intervalo de tempo, sendo possível assim resgatar consideravelmente a resistência do concreto asfáltico. Ao considerar que o produto incorporado à mistura é de baixo valor agregado, por se tratar de material de descarte de processo industrial, e que não influencia na resistência do concreto asfáltico caso este não apresentasse as fibras inseridas, esta é uma boa alternativa de prolongamento da vida útil de algumas rodovias brasileiras.

2.4 DELIMITAÇÕES

O presente trabalho delimita-se à uma única porcentagem de fibras metálicas incorporadas às amostras, de 10% em relação ao peso do ligante utilizado. Essa quantidade de fibras foi selecionada com base em investigação de bibliografia nacional e internacional sobre *induction healing*, sendo elas: García (2011), García *et al.* (2013), Fontoura *et al.* (2018); as quais apontaram para um valor aproximado do utilizado neste trabalho.

Além disso, propõe-se que os ensaios realizados de SCB para análise da máxima resistência alcançada da mistura asfáltica estejam de acordo com a norma europeia EN 12697-44 (2010) e a norma americana AASHTO TP105 (2013), destinadas a amostras semicirculares submetidas a carregamento monotônico.

2.5 LIMITAÇÕES

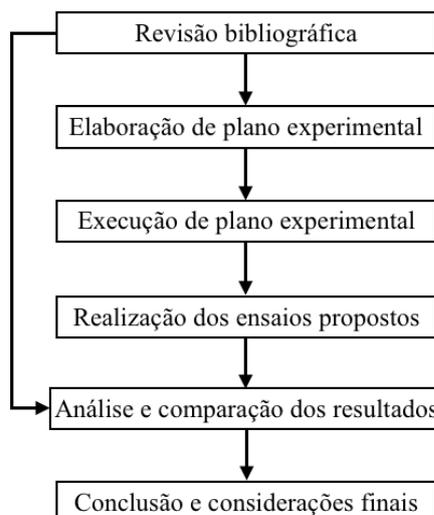
O presente trabalho possui as seguintes limitações:

- a) A análise de condutividade de calor durante o aquecimento por indução eletromagnética foi realizada apenas nas faces externas das amostras, devido a impossibilidade de inserir um dispositivo metálico no centro da amostra sem que este seja afetado pelo campo magnético gerado pela indutora;
- b) A averiguação da distribuição da limalha de aço dentro das amostras não foi realizada, por não dispor dispositivo de raio-x disponível para avaliar esse parâmetro;
- c) Utilizou-se apenas uma mistura asfáltica e os corpos de prova foram moldados no Compactador Giratório *Superpave* (CGS), pois é o único compactador disponível que permite a moldagem de amostras das dimensões solicitadas pela norma do ensaio SCB.

2.6 DELINEAMENTO

A pesquisa se desenvolveu segundo as etapas ilustradas na Figura 1, as quais estão descritas na sequência.

Figura 1 – Diagrama de delineamento



(fonte: elaborado pelo autor)

A primeira etapa deste trabalho consistiu em realizar uma revisão bibliográfica a pesquisas existentes sobre *induction healing* em fontes nacionais e internacionais, tal como a estudos onde já foram incorporadas fibras metálicas a misturas asfálticas. Da mesma forma, neste capítulo constam conceitos básicos sobre análise de vida de fadiga de concreto asfáltico através do ensaio SCB.

Na segunda parte da pesquisa, foi elaborado um plano experimental que contém a quantidade de amostras necessárias para realização dos ensaios propostos, bem como os parâmetros esperados que contivessem cada corpo de prova (CP), tais como dimensões, características dos agregados, do teor de ligante utilizado e porcentagem de fibras adicionadas às misturas.

A etapa seguinte do trabalho consistiu em executar o plano experimental proposto inicialmente, que foi a produção de amostras de misturas asfálticas com a incorporação de limalha de aço na proporção determinada anteriormente. Esses CPs foram desenvolvidos no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Em seguida, na quarta fase, foram realizados os ensaios de ruptura dos corpos de prova moldados por meio do procedimento preconizado pela norma europeia destinada a ensaios de ruptura de amostras semicirculares, e na sequência foi induzido o aquecimento por energia eletromagnética para promover o processo de cura das fissuras geradas na etapa anterior, para efetuar novamente os ensaios que ocorreram na etapa anterior.

Na quinta etapa, foi feita uma análise comparativa dos resultados obtidos antes e depois da indução da cura da mistura asfáltica, para isso se utilizou a bibliografia pesquisada na primeira parte como uma verificação dos resultados.

Por fim, houve a conclusão das análises e comparações feitas na etapa anterior, assim como as considerações finais e sugestões de estudos para trabalhos futuros.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica fundamentada em analisar a literatura disponível acerca dos objetivos desta pesquisa. Há uma análise dos princípios físicos que regem o comportamento de misturas asfálticas contendo adição de componentes metálicos durante o processo de indução eletromagnética, das variáveis fundamentais que devem ser estudadas em processos de indução de aquecimento em revestimentos asfálticos e dos ensaios investigação do comportamento de vida de fadiga do concreto asfáltico, especialmente, o ensaio SCB estático.

3.1 O INDUCTION HEALING EM MISTURAS ASFÁLTICAS

De acordo com Ceratti *et al.* (2014) a camada de rolamento de pavimentos flexíveis possui como função o fornecimento de conforto e segurança aos usuários da via, além de objetivar a transferência dos esforços que atuam na sua superfície às camadas inferiores as quais são constituintes do pavimento e também sua estanqueidade. A perda dessas características é refletida, em grande parte, em forma de surgimento de trincas isoladas ou interligadas e também em deformações permanentes. Segundo os autores, um dos maiores causadores do aparecimento desses defeitos em misturas asfálticas se dá por conta da fadiga, a qual ocorre devido as cargas repetidas do tráfego e resultam em tensões na parte inferior da camada de rolamento.

A capacidade de cura inerente às misturas asfálticas já seria suficiente para recuperar consideravelmente as trincas surgidas na superfície da estrutura do pavimento, porém para permitir que essa característica do concreto asfáltico se estabeleça são necessários longos períodos em que o tráfego de veículos esteja interrompido. Para aumentar essa capacidade de regeneração induz-se o aquecimento da mistura por meio de indução eletromagnética, que é um processo razoavelmente rápido de incremento de temperatura (LIU *et al.*, 2010).

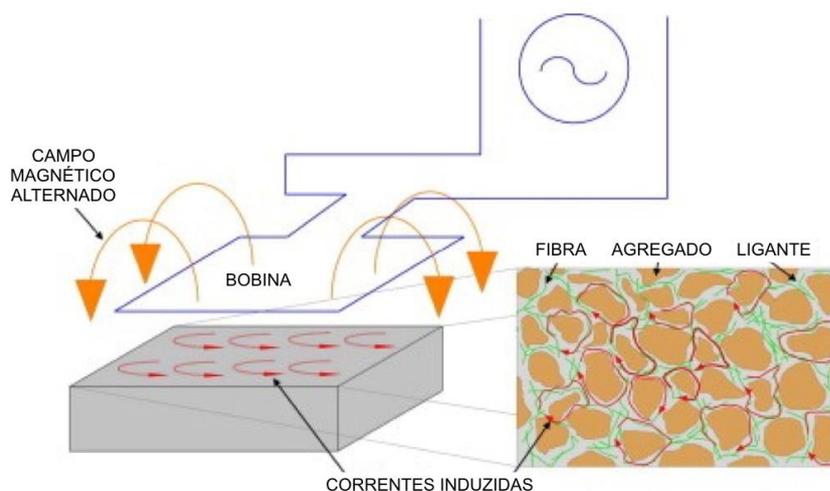
Já se sabe que o asfalto masticado é um material com potencial de auto-regeneração (*self-healing*), contudo há a necessidade de investimento de tempo de descanso longo para desencadear o processo de cura das trincas internas à mistura, o que torna essa alternativa inviável de ser aplicada como solução de restauração. Conforme pesquisas realizadas por Castro e Sánchez (2006), Little e Bhasin (2007), ao se permitir períodos de descanso de 24 horas de

duração pode-se aumentar a vida de fadiga de uma rodovia em mais do que 100%, comparado caso não houvesse qualquer intervenção, porém, esses valores podem variar de acordo com o tipo de asfalto utilizado.

Assim como o tempo de descanso do concreto asfáltico, a temperatura é um dos principais fatores que influenciam na “auto-cura” desse material. Conforme Castro e Sánchez (2006), em situações de carregamentos cíclicos, o ligante asfáltico nas altas temperaturas tende a se modificar de um estado sol a um gel. Se nessas condições for permitido o descanso do pavimento, ou seja, não houver carregamentos, permite uma regeneração quase total do dano causado na camada de rolamento. Por outro lado, sob baixas temperaturas, mesmo com longos períodos sem tráfego, esse dano estrutural seria recuperado apenas parcialmente e de maneira pouco significativa. Seguindo o mesmo raciocínio, Uchida *et al.* (2002), mostraram que o *self-healing* de misturas betuminosas está diretamente associado à temperatura apresentada por elas.

Tendo o conhecimento dos empecilhos sobre o processo de cura autônoma da camada de rolamento de pavimentos asfálticos, tal como o alcance de altas temperaturas e redução no tempo de regeneração, viu-se a necessidade de criar um sistema que possibilitasse a recuperação do microfissuramento que é refletido na superfície do pavimento. Com essa finalidade, segundo García *et al.* 2011, foi proposto adicionar à mistura asfáltica material condutor, a qual pode ser aquecida através do fornecimento de energia por indução eletromagnética, conforme a Figura 2. As fibras são incorporadas à mistura antes desta ser aplicada em campo, e quando constatada a presença de microfissuras, aplica-se o aquecimento. A ação de cicatrizar fissuras menores antes que elas aumentem de tamanho, ajuda a reduzir que os danos sejam maiores afetando o desempenho das demais camadas da estrutura do pavimento.

Figura 2 – Sistema de indução eletromagnética em misturas asfálticas.



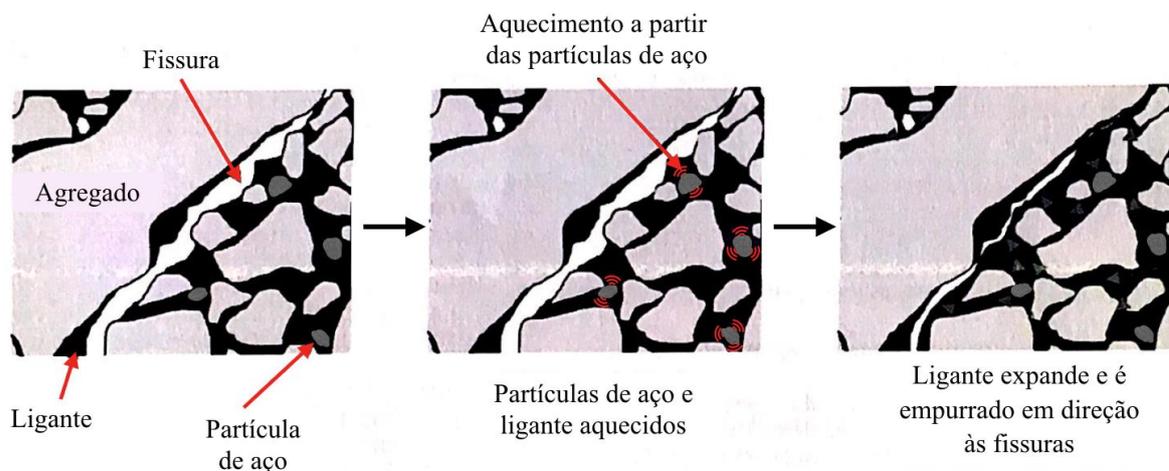
(fonte: adaptado de LIU *et al.*, 2013)

García *et al.* (2011) mostraram que a partir de uma dada temperatura o ligante passa a se comportar como um fluido Newtoniano, assim durante o processo de indução do seu aquecimento esse material se locomove preenchendo a fissura.

De acordo com Liu *et al.* (2013), o processo de aquecimento induzido das fibras incorporadas à mistura asfáltica, que ocorre de forma local por uma fonte externa, faz com que aconteça transferência de calor entre o material metálico aquecido e o componente o qual está em contato (asfalto ou agregado). Essa transferência de energia ocorre através de condução devido a diferença de temperatura entre o componente aquecido e os demais materiais que compõem a mistura, fazendo com que cicatrize as pequenas fissuras ali presentes.

No método de indução, as partículas metálicas podem atingir temperaturas elevadas em um pequeno intervalo de tempo. Conforme pode-se visualizar por meio da Figura 3, à medida que o ligante que reveste os agregados, estes atingem a mesma temperatura por condução, o que provoca a sua expansão térmica e redução da viscosidade.

Figura 3 – Esquema do processo de induction-healing.



(fonte: adaptado de GOMÉZ-MEJIDE *et al.*, 2016)

Como consequência do aquecimento e expansão do ligante, este se torna mais fluido e a pressão interna da região onde se encontra esse material se desenvolve, impulsionando-o para as fissuras, a qual é selada após o término do aquecimento e posterior resfriamento da mistura asfáltica.

3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O *INDUCTION HEALING* EM MISTURAS ASFÁLTICAS

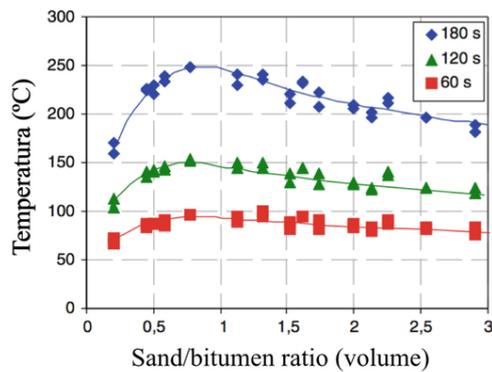
Conforme Rudolf *et al.* (2000), baseados nas leis de Joule, os principais parâmetros que mostraram ter maior influência em aquecimento eletromagnético de fibras de aço isoladas são: frequência eletromagnética do equipamento, potência do gerador, distância a qual a bobina é posicionada diante da amostra a ser aquecida, distribuição das fibras metálicas e tempo de indução. Além disso, sabe-se que para haver passagem de corrente eletromagnética pela rede de fibras.

Já na análise de fibras incorporadas a misturas asfálticas, por não se tratar de material metálico isolado recebendo energia eletromagnética, e sim de uma combinação de materiais com diferentes comportamentos diante do fornecimento de calor à rede metálica, o concreto asfáltico apresenta outras variáveis. Em pesquisa realizada por García *et al.* (2010), foi proposto analisar a variação de alguns parâmetros, tais como teor em volume de fibras, composição química,

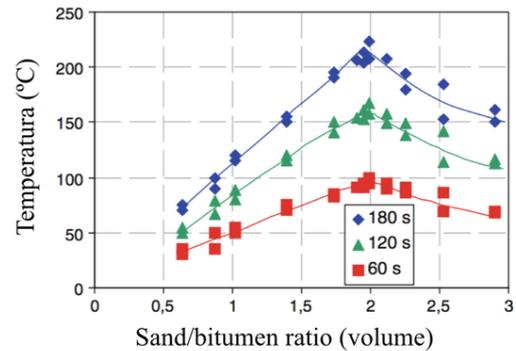
tempo de exposição à indução, temperatura máxima atingida, combinação de cargas e razão areia-betume que as misturas com fibras metálicas poderiam apresentar.

Para ilustrar a variação no comportamento de misturas asfálticas, na Figura 4 são apresentados os diversos alcances de temperatura para misturas em que há diferentes quantidades de material metálico adicionado nas amostras submetidos a variados tempos de indução. Na pesquisa, García *et al.* (2010) utilizaram como componentes metálicos para a confecção dos corpos de prova somente lã de aço ou lã de aço com grafite, em proporções compostas de areia/lã em relação ao volume de ligante da mistura.

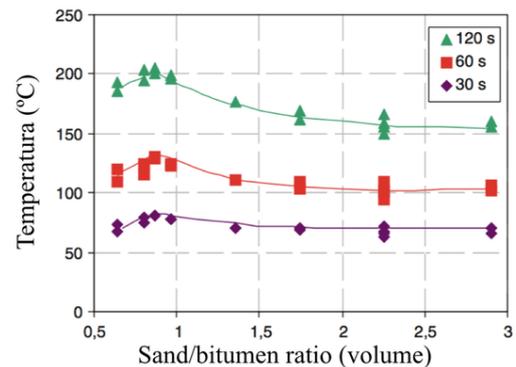
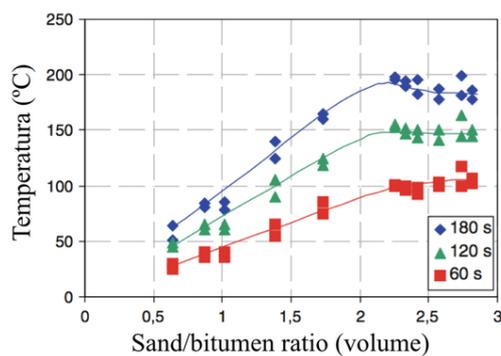
Figura 4 – Influência da quantidade de fibras em uma mistura asfáltica contendo areia para alcances de diferentes temperaturas.



(a) Mistura com 8,76% de fibras de aço



(b) Mistura com 6,54% de fibras de aço

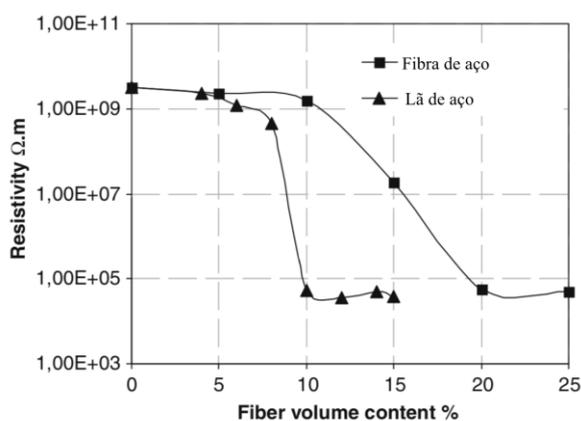


(fonte: GARCIA *et al.*, 2010)

Mais adiante, García *et al.* (2012) realizaram um estudo em que outros aspectos foram avaliados sobre possuírem influência na regeneração devido ao aquecimento de misturas. Desta vez, os parâmetros que foram considerados por García *et al.* (2012) e que geraram como conclusão no ganho de temperatura foram: superfície a qual sofrem aquecimento, permeabilidade magnética do material, frequência da corrente alternada da indutora eletromagnética, intensidade de corrente, resistividade das fibras e a configuração das bobinas do equipamento de indução. Para Tang *et al.* (2016), para que o ligante consiga fluir de maneira satisfatória, eles consideram o ponto de amolecimento uma característica crítica para a mistura. De forma análoga, Ayar *et al.* (2015) afirma que além das características mecânicas da mistura e químicas dos diferentes tipos de ligantes asfálticos existentes, os principais fatores externos que afetam significativamente a capacidade de *healing* são a temperatura e períodos de descanso.

Para Liu *et al.* (2010), o que serviu de base para sua pesquisa foi a análise da condutividade elétrica no concreto asfáltico, que está diretamente interligado ao aquecimento devido a resistividade do material metálico. A variável analisada por utilizado por Liu *et al.* (2010), além de dois formatos distintos de aço, fibra e lâ, foi, mais uma vez, a quantidade desse material dentro da mistura. Na Figura 5 pode-se observar que ambos os parâmetros analisados geraram diferentes condutividades em relação às suas proporções, comprovando a influência destes fatores no *induction healing*.

Figura 5 – Influência da quantidade e formato de aço incorporado a misturas asfálticas para a condutividade elétrica.



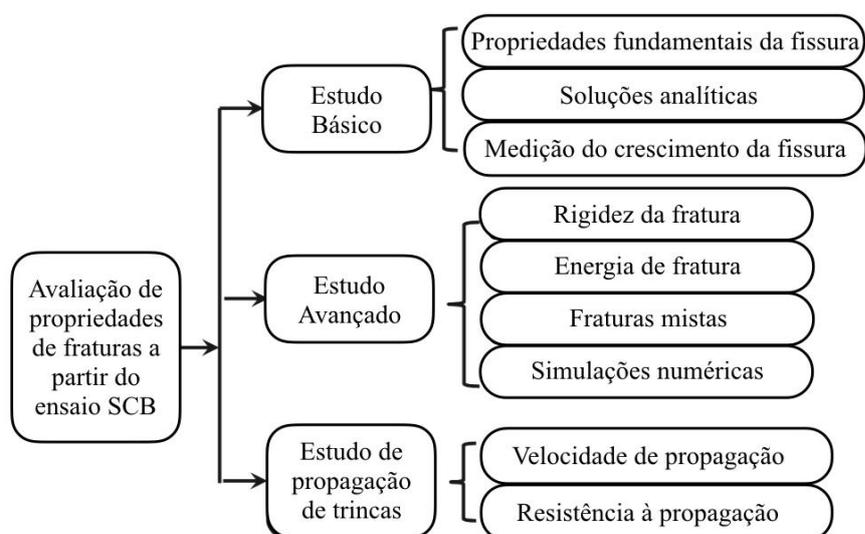
(fonte: adaptado de LIU *et al.*, 2010)

3.2.1 Ensaio SCB

Por estar ganhando cada vez mais visibilidade, segundo Saha e Biligiri (2015), o ensaio SBC tem sido testado em diversas misturas asfálticas a fim de avaliar o comportamento destas e da fissura gerada ao se aplicar carregamentos na parte superior da amostra. Esses tipos de ensaios com amostras semicirculares têm conquistado mais espaço devido sua rapidez de moldagem de corpos de prova e de execução, além de seus resultados fornecerem parâmetros para avaliar o material betuminoso que está sendo empregado no dimensionamento de pavimentos novos (MOLENAAR *et al.*, 2002).

Na Figura 6, ilustra-se esquematicamente as diversas propriedades que podem ser estudadas através do ensaio realizado em amostras semicirculares SCB, de acordo com Saha e Biligiri (2015).

Figura 6 – Esquema de propriedades possíveis de serem estudadas através de ensaios SCB.

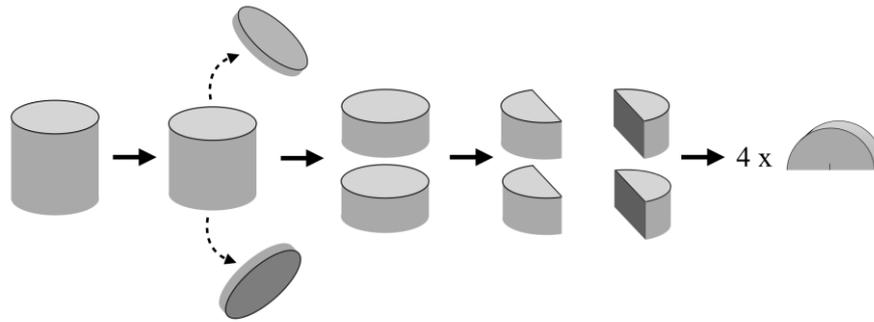


(fonte: adaptado de SAHA e BILIGIRI, 2015)

Os CPs para esse tipo de ensaio são produzidos através da moldagem de amostras em um compactador giratório *superpave* (CGS) com dimensões segundo a norma EN 12697-44 (2010). A partir de um destes corpos de prova se realiza a retirada de uma pequena espessura do topo e da base, em seguida, a peça é dividida em dois, resultando em dois cilindros menores que são divididos ao meio, o qual originam 4 semicírculos, que terão um entalhe produzido no meio da

face inferior, totalizando 4 CPs para a utilização em ensaio SCB obtidos de uma única amostra do compactador giratório. A Figura 7 ilustra esquematicamente o processo de obtenção dos corpos de prova semicirculares

Figura 7 – Esquema de obtenção de amostras semicirculares a partir de um CP *Superpave*.

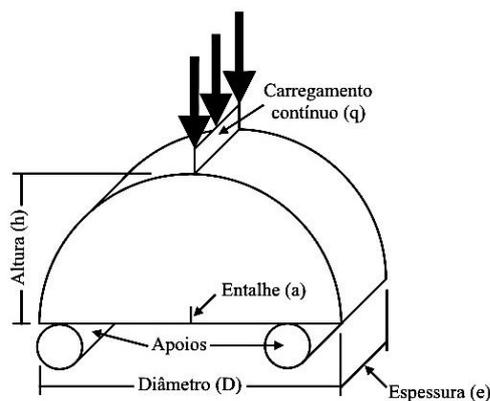


(fonte: elaborado pelo autor)

Atualmente, existem duas normas principais com especificações do procedimento do ensaio SCB estático com carregamento monotônico para misturas asfálticas, sendo elas: Norma Europeia EN 12697-44 (2010) e a Norma Americana AASHTO TP105 (2013).

O procedimento do ensaio SCB estático consiste em aplicar carregamento na parte superior do corpo de prova que gera esforço de tração na região inferior, induzindo a propagação da trinca a partir do entalhe. Na Figura 8 consegue-se visualizar melhor o funcionamento do ensaio. A amostra é apoiada em suas extremidades por dois apoios, possui altura “h”, diâmetro “D”, espessura “e” e altura do entalhe “a”.

Figura 8 – Esquema de funcionamento do ensaio SCB.



(fonte: elaborado pelo autor)

Dentre as duas normas disponíveis citadas anteriormente, optou-se por seguir as especificações da EN 12697-44 (2010), por ter sido a mais utilizada na pesquisa usada como referência para este trabalho.

3.2.1.1 NORMA EUROPEIA EN 12697-44 (2010)

Segundo a norma EN 12697-44 (2010), as amostras já compactadas através do compactador giratório e com as dimensões mostradas na Tabela 1, devem permanecer em uma câmara com temperatura controlada por pelo menos 4 horas para garantir o condicionamento térmico com variação permitida de $\pm 1^\circ\text{C}$. Vale salientar que não há uma temperatura predefinida para condicionar as amostras, porém há uma nota indicando que na maioria dos casos os ensaios são executados a 0°C .

Tabela 1 – Dimensões da amostra semicircular para o ensaio SCB segundo a norma EN 12697-44 (2010).

Altura (h)	Diâmetro (D)	Espessura (e)	Altura do entalhe (a)	Espessura do entalhe
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
75 ± 2	150 ± 1	50 ± 3	10 ± 1	$0,35 \pm 0,10$

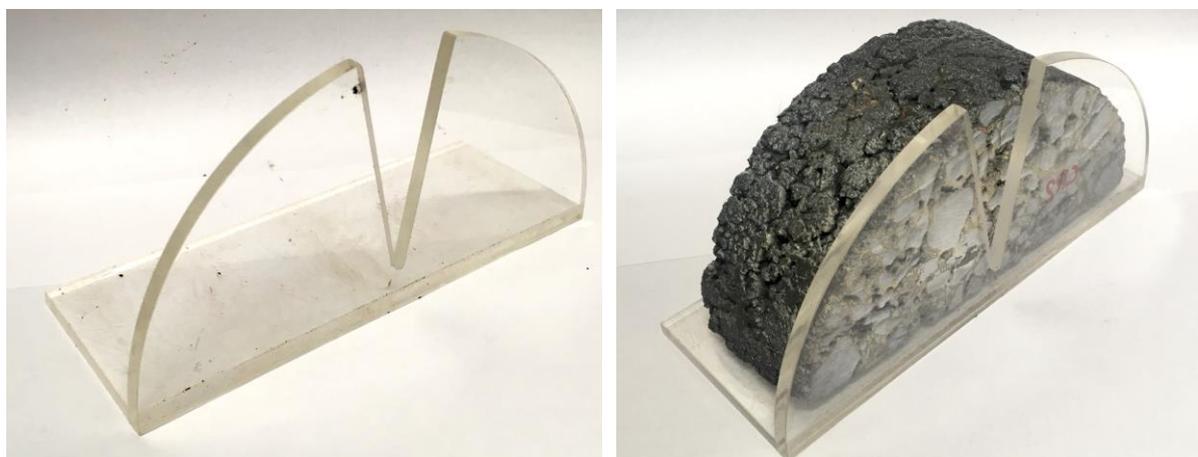
(fonte: elaborado pelo autor)

Após garantido o condicionamento térmico da amostra ela deve ser retirada da câmara e posicionada sobre os apoios pelas extremidades e realiza-se a colocação da célula de carga na parte superior central do CP, mas a uma distância mínima que garanta o não carregamento da amostra antes de iniciar o ensaio.

Depois de preparada a amostra no equipamento aplica-se a carga a uma taxa de $5 \pm 0,2$ mm/min e registrada com precisão de 1 N para a força e 0,01 mm para o deslocamento, e assim traça-se um gráfico onde o eixo das abcissas é o deslocamento e o das ordenadas é a força.

A norma determina que para o ensaio ser dito como “válido” a fissura originada devido o carregamento deve estar inserida em uma área equivalente a uma abertura em “V”, que inicia na abertura do entalhe e vai até uma abertura equivalente a 10% do valor de “D” com precisão de ± 15 mm. Essa necessidade de verificação é para diminuir a variabilidade nos resultados do ensaio. A Figura 9 ilustra um exemplo de peça que pode ser utilizada para determinar a validação do ensaio.

Figura 9 – Equipamento utilizado para determinar a validação do ensaio SCB.



(fonte: o próprio autor)

Essa necessidade de verificação é para diminuir a variabilidade nos resultados do ensaio, porém este critério não foi utilizado como classificatório de validação nesta pesquisa, pois a espessura do entalhe, diferentemente da norma, não foi de 0,35 mm. Como só se conseguiu disco de serra da espessura de 1,0 mm então a propagação da fissura poderia seguir o percurso lateral em algum dos cantos superiores na pré-trinca.

Para cada corpo de prova, o qual deve ser no mínimo 4 segundo a norma, determina-se a força máxima ($F_{máx,i}$) e a deformação vertical máxima (ΔW_i) e calcula-se a deformação correspondente de acordo com a Equação 1.

$$\varepsilon_{máx,i} = \frac{\Delta W_i}{W_i} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde,

$\varepsilon_{máx,i}$: deformação correspondente à máxima força da amostra “i” (%);

W_i : altura da amostra (mm);

Em seguida, determina-se a máxima tensão ($\sigma_{máx}$) de acordo com a Equação 2.

$$\sigma_{máx} = \frac{4,263 \cdot F_{máx,i}}{D_i \cdot t_i} \quad (2)$$

Onde,

$\sigma_{máx}$: máxima tensão (N/mm²);

D_i : diâmetro da amostra (mm);

t_i : espessura da amostra (mm).

Aplicando o ensaio descrito acima para a mistura com adição de fibras e realizando uma comparação entre as máximas forças obtidas ($F_{máx,i}$) antes e depois das amostras estarem submetidas a indução eletromagnética, irá calcular-se a razão segundo a Equação 3.

$$S_h = \frac{F_a}{F_0} \quad (3)$$

Onde,

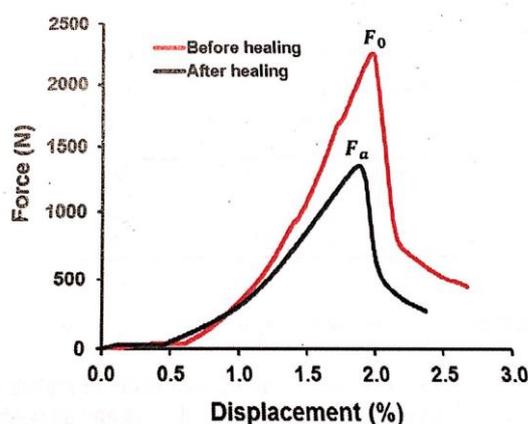
S_h : nível de cura obtido com o *induction healing* (%);

F_0 : carga máxima alcançada pela mistura asfáltica antes da indução eletromagnética (kN);

F_a : carga máxima alcançada depois da indução da cura (kN).

Baseado nos resultados obtidos por N-Contreras e García (2016), com a realização do ensaio SCB e com a indução da recuperação da mistura asfáltica pelo fornecimento de energia, acredita-se que os corpos de prova consigam atingir um nível próximo do alcançado inicialmente. A Figura 10 ilustra o resultado encontrado por N-Contreras e García (2016) em uma amostra semicircular por ruptura à flexão simples com adição de 4% de fibras metálicas antes e depois do *healing*.

Figura 10 – Gráfico com alcance de carregamento máximo antes e depois do *induction healing*.



(fonte: N-CONTRERAS e GARCÍA, 2016)

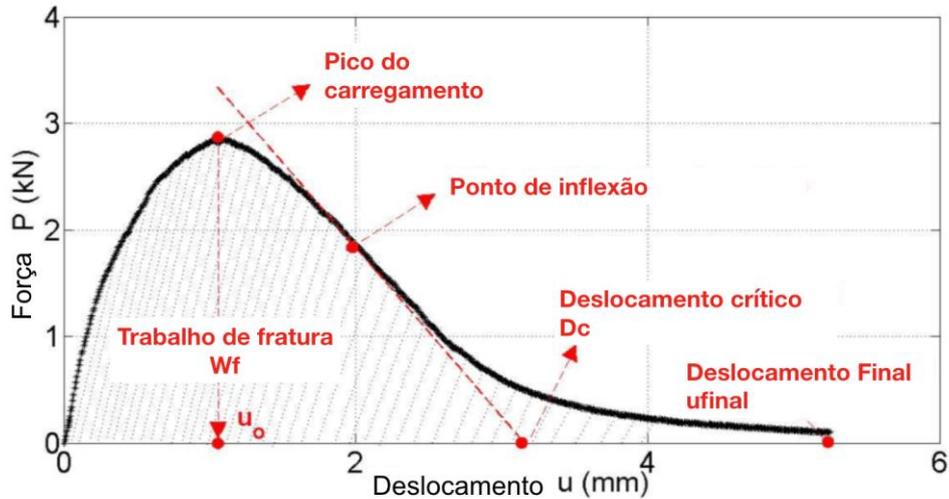
3.2.1.2 NORMA AMERICANA AASHTO TP105 (2013)

A norma americana AASHTO TP105 (2013) possui algumas diferenças em seu protocolo em relação à norma EN 12697-44 (2010), tais como limites nas dimensões da amostra e altura do entalhe, temperatura de execução do ensaio, número mínimo de amostras a serem ensaiadas, taxa de carregamento e término do carregamento, porém estas não serão detalhadas pois não faz parte do escopo deste trabalho realizar comparações entre ambos os procedimentos.

Para este trabalho optou-se por executar a metodologia segundo a norma europeia EN 12697-44 (2010) pois já foi realizado um estudo por Godoi (2017) seguindo esta norma e com as mesmas propriedades da mistura e que serviram de base para este trabalho. Entretanto, alguns parâmetros obtidos pela curva originada pelo ensaio foram calculados segundo as equações da norma americana AASHTO TP105 (2013), as quais serão descritas na sequência.

Com os dados de saída obtidos do ensaio, traça-se uma curva força vs. Deslocamento conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Curva força vs. deslocamento originada pelo ensaio SCB.



(fonte: adaptado da norma AASHTO TP105, 2013)

A partir da curva a norma indica primeiramente realizar a medição do Trabalho de Fratura (W_f) que consiste em calcular a área sob a curva traçada mostrada na Figura 11. Em seguida, realiza-se a medição da área de ligamento entre as faces geradas pela abertura da fissura, conforme Equação 4.

$$A_{lig} = e \cdot (h - a) \quad (4)$$

Onde,

A_{lig} : área de ligamento (mm^2);

e : espessura da amostra (mm);

h : altura da amostra (mm);

a : altura do entalhe (mm).

Na sequência, calcula-se a Energia de Fratura (G_f), por meio da Equação 5, que consiste em dividir o trabalho de fratura pela A_{lig} encontrada.

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \cdot 10^6 \quad (5)$$

Onde,

G_f : energia de fratura (J/ m²);

W_f : trabalho de fratura (J);

A energia de fratura encontrada é um parâmetro diretamente relacionado às dimensões do corpo de prova, ela representa a resistência da mistura em propagar a fissura gerada pelo carregamento.

Na curva gerada, outro parâmetro importante é a inclinação ($|m|$) da reta tangente à curva que passa pelo ponto de inflexão da rampa de descarregamento, que permite realizar uma comparação do quão dúctil a mistura asfáltica se comporta diante do carregamento aplicado. Ao realizar o prolongamento desta reta, encontra-se o ponto chamado de deslocamento crítico da curva (Dc).

Por fim, munidos dos parâmetros encontrados anteriormente, calcula-se o índice de flexibilidade (FI) da mistura, conforme calculado segundo a Equação 6.

$$FI = \frac{G_f}{|m|} \cdot 0,01 \quad (6)$$

Onde,

FI : índice de flexibilidade;

$|m|$: valor absoluto de inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão da zona de descarregamento da curva após pico.

O FI encontrado é um novo parâmetro utilizado a fim de reconhecer misturas frágeis, ou seja, que são propensas à fratura prematura (GODOI, 2017).

3.3 INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE FIBRAS METÁLICAS

Conforme citado anteriormente, a ideia de tornar a mistura asfáltica eletricamente condutora de energia ocorre devido a adição do componente metálico no asfalto, o que permite que se induza o aquecimento dessas fibras.

Segundo Liu, Wu e Schlangen (2013), o princípio básico da indução eletromagnética neste caso pode ser descrito de acordo com as leis de Faraday, onde a corrente elétrica pode ser criada a partir de um campo eletromagnético. Conforme Rudolf, Mitschang e Neitzel (2000) a relação entre a fonte e a força eletromotriz é dada pela Equação 7.

$$U_{ind} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu \cdot H \cdot A \quad (7)$$

Onde,

U_{ind} : força eletromotriz (V);

f : frequência do campo magnético (Hz);

μ : permeabilidade magnética do material metálico ($H \cdot m^{-1}$);

H : intensidade do campo magnético (T);

A : área delimitada pela curva formada pela fibra (m^2).

Sabe-se que a força eletromotriz é cada vez maior quanto mais rápido ocorrer a variação do fluxo magnético no circuito em questão. Sendo assim, para gerar uma força eletromotriz constante, como deseja-se que aconteça para as fibras da mistura asfáltica, é importante que o equipamento que irá gerá-lo também forneça um campo magnético constante a partir de uma frequência também constante.

Segundo a primeira lei de Joule, a potência do calor gerado por uma corrente elétrica é diretamente proporcional ao quadrado desta, e da resistência do material condutor, conforme Equação 8.

$$P = I^2 \cdot R \quad (8)$$

Onde,

P: potência dissipada (W);

I: corrente elétrica (A);

R: resistência elétrica da fibra (ohms).

Em resistores, conforme mostrado por Ohm no início do século XIX, a corrente elétrica é diretamente proporcional à diferença de potencial, no caso deste trabalho U_{ind} , e a constante de proporcionalidade é a resistência do condutor, conforme Equação 9.

$$U_{ind} = I \cdot R \quad (9)$$

Fazendo a substituição das equações acima, tem-se a Equação 10.

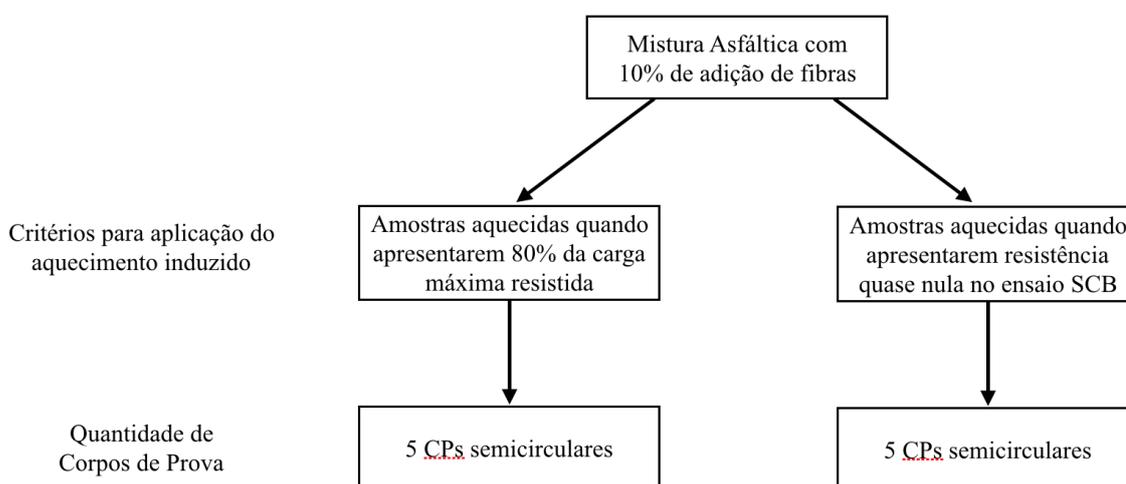
$$P = \frac{U_{ind}^2}{R} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot \mu^2 \cdot H^2 \cdot A^2}{R} \quad (10)$$

Conforme dito antes, o campo magnético, a força eletromotriz e a frequência são constantes no processo de indução do aquecimento, sendo assim, a potência do aquecimento vai depender diretamente ao quadrado da área formada pela fibra e inversamente à resistência do material que compõe esta. Ou seja, quanto maior a quantidade de aditivos metálicos incorporados à mistura asfáltica, menor será a resistência elétrica desta e conseqüentemente o aquecimento ocorrerá mais rapidamente (LIU, WU e SCHLANGEN, 2013).

4 PLANO EXPERIMENTAL

Após estudar a bibliografia existente sobre ensaios com amostras semicirculares e *induction healing* foi elaborado um plano experimental que satisfizesse as normas utilizadas para o ensaio SCB estático em ambos limites de finalização do rompimento dos corpos de prova e permitisse uma satisfatória aquisição de dados para avaliação do potencial de cura da mistura asfáltica. A Figura 12 mostra o plano experimental executado ao longo deste trabalho.

Figura 12 – Plano experimental.



(fonte: elaborado pelo autor)

A mistura de referênca utilizou os mesmos agregados, ligante e cal do que os utilizados no presente trabalho, a diferença se deu apenas na adiço do material metálico condutor. Para realizar a comparaço do *healing* alcançado com o rompimento praticamente total das amostras e parcial foram moldados 5 corpos de prova no Compactador Giratório, os quais foram serrados para obtenço de um total de 10 amostras semicirculares ensaiadas. Porém, devido falha no processo de serragem e induço, perderam-se 2 CPs por dimensõ fora de norma ou supraaquecimento, resultando 8 amostras semicirculares ensaiadas.

Para cada uma das amostras foi realizado o ensaio SCB, seguido de aquecimento por induço eletromagnética e por fim foi realizado, novamente, um rompimento de cada corpo de prova

por meio do mesmo ensaio realizado inicialmente, para avaliação da influência do *induction healing* na mistura de referência.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos itens a seguir serão apresentadas a caracterização dos agregados, do ligante e da limalha de aço utilizados na confecção das amostras deste trabalho, assim como serão detalhados os procedimentos utilizados durante a fabricação dos corpos de prova. Neste capítulo também será apresentada e analisada a metodologia a qual foi utilizada para a aquisição dos resultados.

5.1 MATERIAIS

A mistura asfáltica utilizada nos experimentos foi dimensionada por Mensch (2017) no LAPAV durante sua tese de mestrado, com agregados e ligantes caracterizados por ela em seu trabalho. Da mesma forma, foi levado em consideração conforme mostrado por Fontoura *et al.* (2018) que a adição de fibras originadas de processo industrial de fabricação de peças de cutelaria, na proporção definida de 10% em relação ao peso do ligante para mesma mistura, não mostrou significativa alteração na resistência desta, podendo ser empregada na matriz asfáltica sem perdas de suas características desejadas.

5.1.1 Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa possuem origem basáltica, originados de uma pedreira localizada na região metropolitana de Porto Alegre-RS. Foi eleita a utilização deste agregado por já possuírem estudos prévios acerca de suas características e por já possuir este material disponível no laboratório, além deste tipo de agregado ser empregado com frequência considerável em obras rodoviárias no estado. Na composição, junto ao agregado, foi utilizada a adição de cal dolomítica do tipo CHI com a finalidade de ajudar na adesividade do ligante. Na Tabela 2 e Tabela 3 são apresentados os resultados de aceitação e características do material pétreo, respectivamente.

A granulometria utilizada dos agregados para a composição da mistura utilizada neste trabalho foi enquadrada na Faixa C do DNIT, na proporção, 24% de brita 3/4", 24% de brita 3/8", 50% de pó de pedra e 2% de filler (cal). Na Tabela 4 é apresentada a composição granulométrica do agregado e na Figura 13 está sendo mostrada a curva granulométrica utilizada na mistura de referência sem a adição da limalha de aço enquadrada nos limites da Faixa C do DNIT.

Tabela 2 – Ensaios de aceitação do agregado.

Propriedade	Método	Especificação DNIT	Resultado
Índice de Forma	DNER-ME 086/94	> 0,5	60%
Equivalente de Areia	DNER-ME 054/97	≥ 55%	101%
Adesividade a Ligante Betuminoso	DNER-ME 078/94	Satisfatório	Satisfatório
Desgaste à Abrasão	DNER-ME 035/98	≤ 50%	10%
Durabilidade	DAER/RS-EL 104/01	≤ 12%	0,53%

(fonte: MENSCH, 2017)

Tabela 3 – Características do material.

Propriedade	Método	Resultado		
		3/4"	3/8"	Pó de Pedra
Massa Esp. Real - Agregado Graúdo (kg/m³)	DNER-ME 081/98	2,82	2,84	-
Massa Esp. Real - Agregado Miúdo (kg/m³)	DNER-ME 084/95	-	-	2,87
Massa Esp. Aparente do Grão (kg/m³)	DNER-ME 081/98	2,73	2,68	2,69
Absorção (%)	DNER-ME 081/98	1,18	2,02	2,25
Massa Esp. Solta do Agregado Graúdo (LUW)	AASHTO T 19	1,55	1,52	1,69
Massa Esp. Compactada do Agregado (LUW)	AASHTO T 19	1,66	1,61	1,92

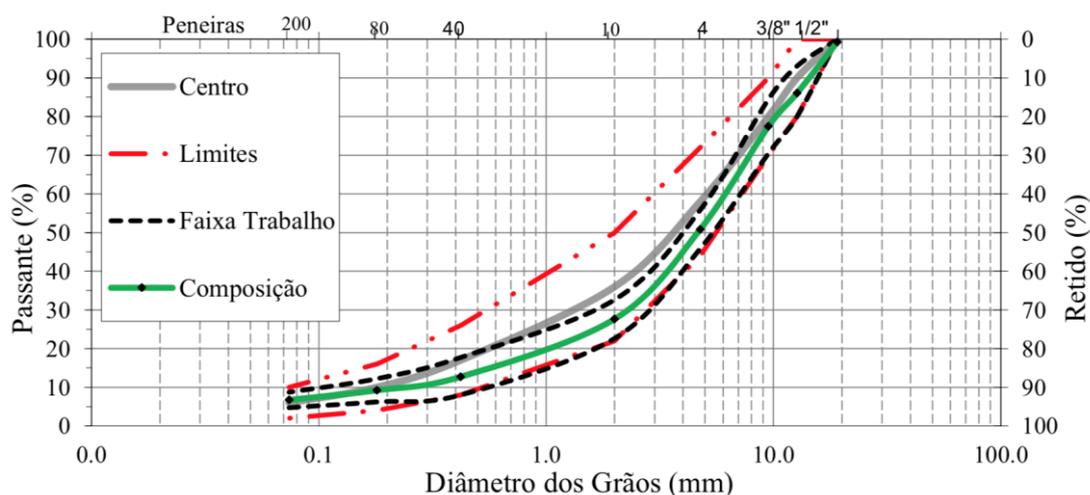
(fonte: MENSCH, 2017)

Tabela 4 – Composição granulométrica dos agregados.

Peneira	(mm)	3/4"	3/8"	Pó de pedra	Cal
1 1/2"	38,10	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,40	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,10	97,02	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	41,87	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,50	8,96	97,12	100,00	100,00
4	4,76	1,25	6,81	93,53	100,00
10	2,00	1,24	1,43	47,85	100,00
40	0,42	1,23	1,41	19,28	100,00
80	0,180	1,21	1,40	12,72	97,00
200	0,074	1,09	1,35	8,53	84,14

(fonte: MENSCH, 2017)

Figura 13 – Curva granulométrica dos agregados.



(fonte: MENSCH, 2017)

5.1.2 Ligante asfáltico

Neste trabalho o ligante utilizado foi o cimento asfáltico de petróleo (CAP) convencional, denominado CAP50/70. Na Tabela 5 apresentam-se os limites utilizados para caracterização do ligante usado na confecção das misturas de acordo com a Agência Nacional do Petróleo (ANP), assim com os resultados obtidos no ensaios de Viscosidade Brookfield, Densidade de Materiais Betuminosos, Ponto de Amolecimento, Penetração e Índice de Susceptibilidade Térmica (IST).

Tabela 5 – Propriedades do ligante asfáltico CAP50/70 e especificações ANP (2005).

Ensaio	Especificação ANP	CAP 50/70	
Viscosidade Brookfield NBR 15184 (cP)	135°C	mínimo 274	328
	150°C	mínimo 112	165
	177°C	57 a 285	62
Densidade de materiais betuminosos NBR 6296	-		1,0091
Ponto de amolecimento NBR 6560 (°C)	mínimo 46		48
Penetração - NBR 6576 (0.1mm)	50 a 70		61
Índice de susceptibilidade térmica (IST)	(-1,5) a (+0,7)		-1,2

(fonte: MENSCH, 2017)

5.1.3 Fibras de aço

O material metálico selecionado para ser incorporado à mistura asfáltica que permite o aquecimento por indução eletromagnética é um resíduo industrial, cujo componente principal é a chamada limalha de aço, a qual apresenta em sua composição, majoritariamente, material ferroso. Esta limalha é originada de processo de fabricação de utensílios para uso geral, principalmente cutelaria. Por se tratar de um resíduo, este componente metálico é descartado ao final do processo de retífica industrial, que consiste no desgaste abrasivo de uma determinada peça para conferir-lhe acabamento superficial, não apresentando, até o presente momento, valor econômico comercial. Devido a isso, o emprego deste resíduo em misturas asfálticas torna-se viável em relação ao seu custo.

Para a caracterização das fibras de aço foi realizada análise química por meio de fluorescência de Raios-x e investigação de sua morfologia por observação de imagens de sua microestrutura obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Ao analisar os componentes químicos principais encontrados na limalha, constatou-se que a maior quantidade identificada foi a de ferro (Fe), que é o elemento responsável pelo aquecimento por indução eletromagnética. Na Tabela 6 apresentam-se os elementos químicos principais encontrados na limalha e suas proporções.

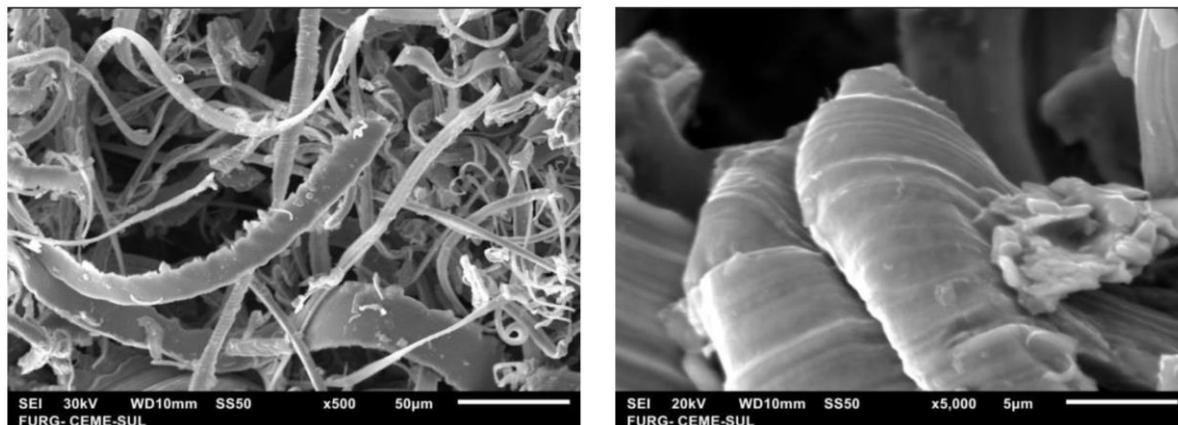
Tabela 6 – Composição Química do resíduo.

Elemento	Proporção (%)
Ferro (Fe)	91,4
Alumínio (Al)	7,2
Manganês (Mn)	0,66
Cromo (Cr)	0,18
Silício (Si)	0,56

(fonte: GARCEZ *et al.*, 2018)

Para a obtenção das imagens da microestrutura das fibras foi utilizado o microscópio eletrônico tipo JEOL 6060 operando a 30 kV e 20kV. Ao analisar as imagens apresentadas na Figura 14, foi possível constatar que o diâmetro médio da limalha é de, aproximadamente, 5,8 μm (GARCEZ *et al.*, 2018).

Figura 14 – Micrografia da limalha de aço utilizada na mistura com aproximação de 100x e 5000x, respectivamente.

(fonte: GARCEZ *et al.*, 2018)

5.1.4 Características da mistura

Para a realizar a caracterização da mistura com a adição da limalha, além das características apresentadas na Tabela 7, foram realizados os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e Módulo de Resiliência (MR), para realizar a comparação com a mistura de referência sem adição de fibras. Os ensaios de RT e MT foram realizados baseados nos

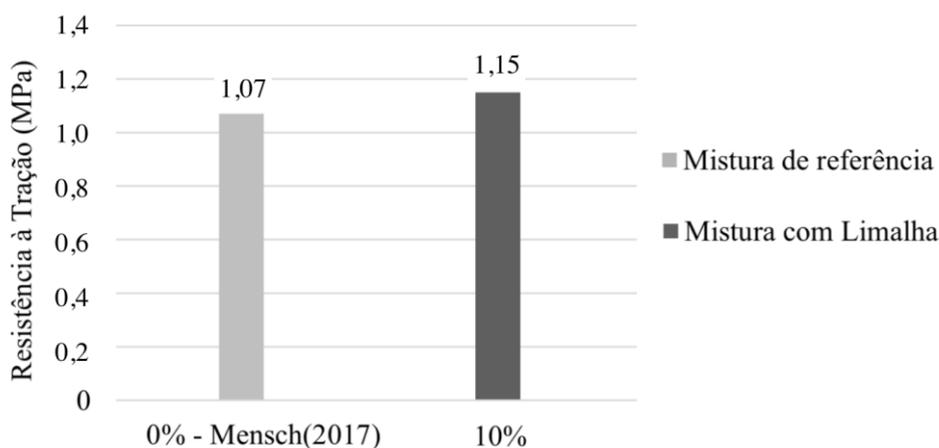
procedimentos das normas DNIT 135 (2010) e DNIT 136 (2010). Na Figura 15 e Figura 16 são apresentados os resultados dos ensaios de RT e MR com relação à mistura de referência.

Tabela 7 – Características da mistura com adição de 10% de limalha de aço em relação ao peso do ligante.

Propriedade	Especificação DNIT - ES 031/2006	Mistura com 10% de fibras
Teor de Projeto (%)	-	5,3
Volume de Vazios (%)	3 a 5	3,9
Relação Betume Vazios (%)	72 a 82	76,49
Vazios do Agregado Mineral (%)	> 15	16,72
Massa Específica Máx. Medida (kN/m³)	-	25,13
Massa Específica Aparente (kN/m³)	-	24,14
Estabilidade (kgf)	> 500	607
Fluência (1/100 in)	8 a 18	8,0

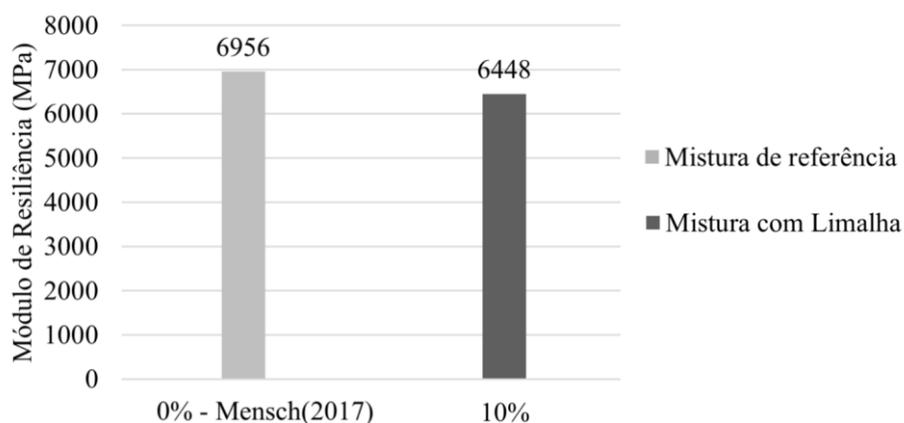
(fonte: FONTOURA *et al.*, 2018)

Figura 15 – Resultados de Resistência à Tração para mistura de referência e mistura com adição de 10% de limalha de aço.



(fonte: FONTOURA *et al.*, 2018)

Figura 16 – Resultados de Módulo de Resiliência para mistura de referência e mistura com adição de 10% de limalha de aço.



(fonte: FONTOURA *et al.*, 2018)

5.2 MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os métodos laboratoriais utilizados durante o trabalho. Todos os procedimentos de fabricação de amostras e ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação da UFRGS e o aquecimento por indução eletromagnética das amostras foi executado em uma indústria de peças e caixas de transmissão da região metropolitana de Porto Alegre.

5.2.1 Produção da mistura e moldagem das amostras

Para a produção da mistura utilizada neste trabalho, primeiramente, os agregados e a cal caracterizados na seção anterior foram aquecidos a uma temperatura de 163 °C e o ligante a 153 °C, em seguida foram misturados juntos com a limalha de aço em cuba aquecida a 140 °C com capacidade de 10 litros. Para permitir distribuição da limalha de maneira mais homogênea possível, esta foi peneirada logo após a colocação dos agregados para posterior colocação na cuba conforme mostrado na Figuras 17 (a) e (b).

Figura 17 – (a) Peneiramento da limalha; (b) Materiais secos dentro da cuba aquecida.



(fonte: FONTOURA *et al.*, 2018)

Antes de ser adicionado o ligante a mistura seca foi misturada até obtenção de um aspecto homogêneo, a fim de evitar a formação de aglomerados por parte da limalha. Segundo García *et al.* (2013) a concentração e aglomeração de fibras dentro do corpo de prova influencia diretamente na distribuição de calor por meio de aquecimento induzido. Após o processo de mistura dos componentes secos adicionou-se o ligante e tornou-se a misturar o material.

Depois de feita a mistura, esta foi disposta em uma bacia conforme Figura 18 (a) e colocada em estufa na mesma temperatura de compactação por um período de 2 horas, esta fase é realizada com o intuito de simular o envelhecimento a curto prazo que ocorre na mistura durante o processo de usinagem. Depois do período de envelhecimento por 2 horas em estufa, os materiais misturados foram colocados dentro de molde (Figura 18 (b)) e compactados no compactador giratório (CGS) (Figura 18 (c)), resultado em amostras com 150 mm de diâmetro e 120 mm de altura (Figura 18 (d)).

Figura 18 – (a) Mistura pronta para ser aquecida por período de envelhecimento; (b) Colocação de mistura no molde após envelhecimento; (c) Amostra extraída do molde já compactada por meio do CGS; (d) Corpos de prova resultante da moldagem *Superpave*.



(fonte: o próprio autor)

O CGS aplica uma pressão de compactação na amostra de 600 kPa, com ângulo de giração de $1,25^\circ$ a uma taxa de 30 giros por minuto. Para a moldagem dos corpos de prova neste equipamento é definida uma massa específica inicial que deve originar um índice de vazios em função da altura e da quantidade de material do CP desejado. Esta metodologia de compactação

pelo CGS é considerada a mais próxima do que é empregado em campo por meio de rolos compactadores.

5.2.2 Determinação do Volume de Vazios (V_v)

Depois de concluída a compactação dos corpos de prova, estes são colocados para “descansar” e esfriar entre o dia da moldagem e o posterior. No dia seguinte à confecção dos CPs estes são submetidos ao procedimento da Norma NBR 15573 (2012), que consiste na coleta das dimensões das amostras e pesagem ao ar, imersos em água e saturados com superfície seca (Figura 19), para cálculo do volume de vazios (V_v), o qual deve estar entre 3,0% e 5,0%.

Figura 19 – Determinação do volume de vazios.



(fonte: o próprio autor)

5.2.3 Fabricação das amostras semicirculares

As amostras moldadas por meio do Compactador Giratório possuem dimensões de 150 mm de diâmetro e 120 mm de altura. Para que resultem em amostras com as dimensões preconizadas segundo a norma europeia EN 12697-44 (2010) é necessário serrar estas amostras.

Esse processo de serragem inicial foi realizado por meio de uso de uma serra com disco diamantado do modelo Weber CUT 40-K, que utiliza circulação de água durante o corte. Já a

abertura da pré-trinca, a qual deve possuir $0,35 \pm 0,1$ mm de espessura segundo a norma, utilizou-se uma serra de disco de corte a seco com espessura menor do que a diamantada. Contudo, a espessura mínima conseguida para a pré-trinca foi de 1,0 mm, pois não foi encontrado disco de corte com espessura menor compatível com o equipamento disponível.

Para a fabricação das amostras semicirculares, primeiramente foram retirados 10 mm da superfície superior e 10 mm da base do CP de 120 mm de altura (Figura 20 (a)); em seguida serrou-se os 100 mm restantes ao meio (Figura 20 (b)), originando dois cilindros menores com 50 mm de espessura cada um; na sequência, cada cilindro de 50 ± 3 mm foi serrado ao meio, originando duas meia luas; e por fim, foi feito o entalhe com 10 ± 1 mm de altura, resultando em um corpo de prova semicircular conforme mostrado na Figura 20 (c).

Figura 20 – Processo de serragem para obtenção das amostras semicirculares.



(fonte: o próprio autor)

Para permitir melhor a visualização da propagação da fissura durante o ensaio, as amostras tiveram suas faces laterais pintadas com *spray* de tinta branca, resultando em amostras semicirculares prontas para serem ensaiadas conforme Figura 21.

Figura 21 – Amostra semicircular pronta.



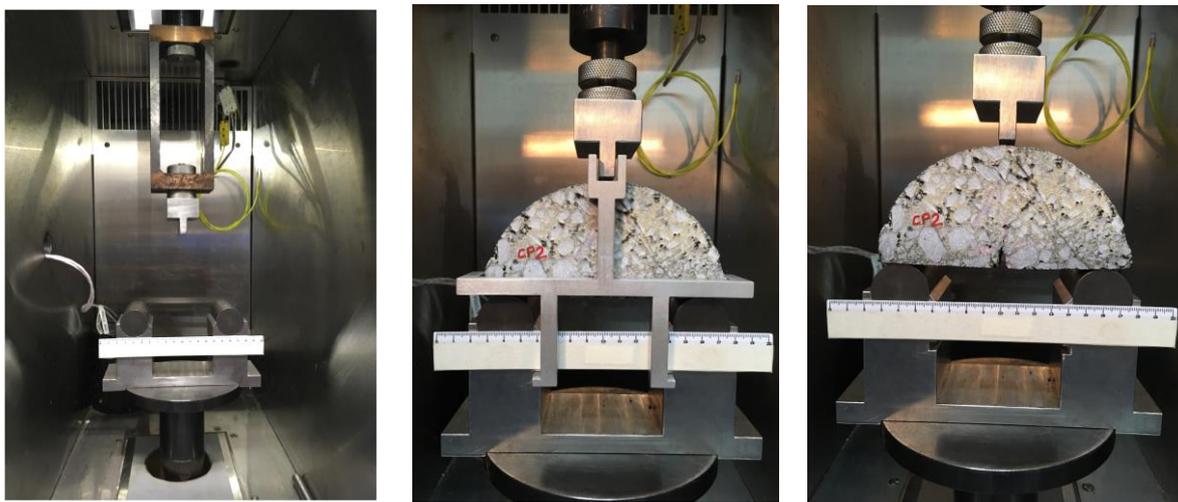
(fonte: o próprio autor)

5.2.4 Ensaio de fratura em amostras semicirculares

O ensaio de fratura em amostras com formato semicircular executado neste trabalho seguiu as especificações segundo a Norma Europeia EN 12697-44 (2010). Já com as amostras fabricadas, estas foram colocadas em uma câmara com temperatura controlada a 20 ± 1 °C por um período de, no mínimo, 4 horas. Para a adaptação do equipamento *Material Test System* (MTS), são posicionados na parte inferior a base com o suporte e os cilindros que servem de apoios para as amostras a serem ensaiadas e o cabeçote onde será aplicado o carregamento, como pode-se visualizar na Figura 22 (a).

Após o condicionamento do CP, este é retirado da câmara e rapidamente é posicionado sobre os apoios cilíndricos em suas extremidades com o auxílio do aparato ilustrado na Figura 22 (b), para garantir o perfeito alinhamento da amostra semicircular com o equipamento e o cabeçote da parte superior. Com isso, o protocolo da norma EN 12697-44 (2010) foi seguido e o ensaio com carregamento monotônico está pronto para ser iniciado (Figura 22 (c)). Para permitir, ademais dos parâmetros fornecidos pela MTS para esse procedimento, a medição do tamanho da fissura aberta na parte tracionada da amostra, foi posicionada também uma régua no alinhamento dos cilindros.

Figura 22 – Procedimento de montagem no ensaio SCB.



(fonte: o próprio autor)

Munido do CP posicionado na MTS, é empregada uma carga de assentamento manualmente de 0,1 kN e então inicia-se o ensaio, o qual ocorre a uma taxa de deslocamento de $5 \pm 0,2$ mm/min com precisão de 0,01 mm. Já para o carregamento, o registro de dados ocorre com precisão de 1N ao longo de todo o ensaio.

Para este trabalho optou-se por utilizar dois critérios de finalização do ensaio: o primeiro consiste em programar a MTS para encerrar automaticamente o carregamento quando a carga registrada reduzir em 20% do valor máximo registrado da curva carga x deslocamento; o segundo critério é composto por interromper o carregamento apenas quando a carga registrada se aproximasse a 100N. A seleção de 20% do valor de pico se deu a fim de garantir que a carga máxima resistida pela amostra fosse atingida e ao mesmo tempo não decaísse significativamente a ponto de a curva força vs. deslocamento entrar na zona da rampa de descida.

Estes dois métodos de finalização foram determinados com o intuito de realizar uma comparação entre os resultados de *healing* obtidos quando o aquecimento for aplicado em situação onde o pavimento se encontra fissurado, porém ainda sem a presença de grandes fissuras (primeiro critério); e o outro, quando a indução do *healing* for empregada em um cenário em que o pavimento se apresenta em nível mais degradado comparado ao primeiro,

com fissuras de maior tamanho (segundo critério), simulando uma medida preventiva e outra corretiva, respectivamente, de intervenção para a restauração do pavimento.

Após interrupção do carregamento de cada CP, foi feito registro de uma fotografia para avaliação do tamanho da fissura aberta na parte inferior das amostras e em seguida foi executado o procedimento de validação do ensaio por meio do aparato acrílico, conforme recomendado pela norma (Figura 9). Por fim, cada amostra foi envolvida por duas voltas de uma fita adesiva tipo crepe com 490 mm de largura (Figura 23). Esse mecanismo foi adotado visando estabelecer um contato entre as faces internas geradas pelo surgimento da fissura. A fita foi mantida até o momento exatamente anterior ao aquecimento do CP, e precisou ser retirada para monitoramento do ganho de temperatura que ocorre por meio da superfície da amostra.

Figura 23 – Amostra envolvida por fita crepe após ruptura.



(fonte: o próprio autor)

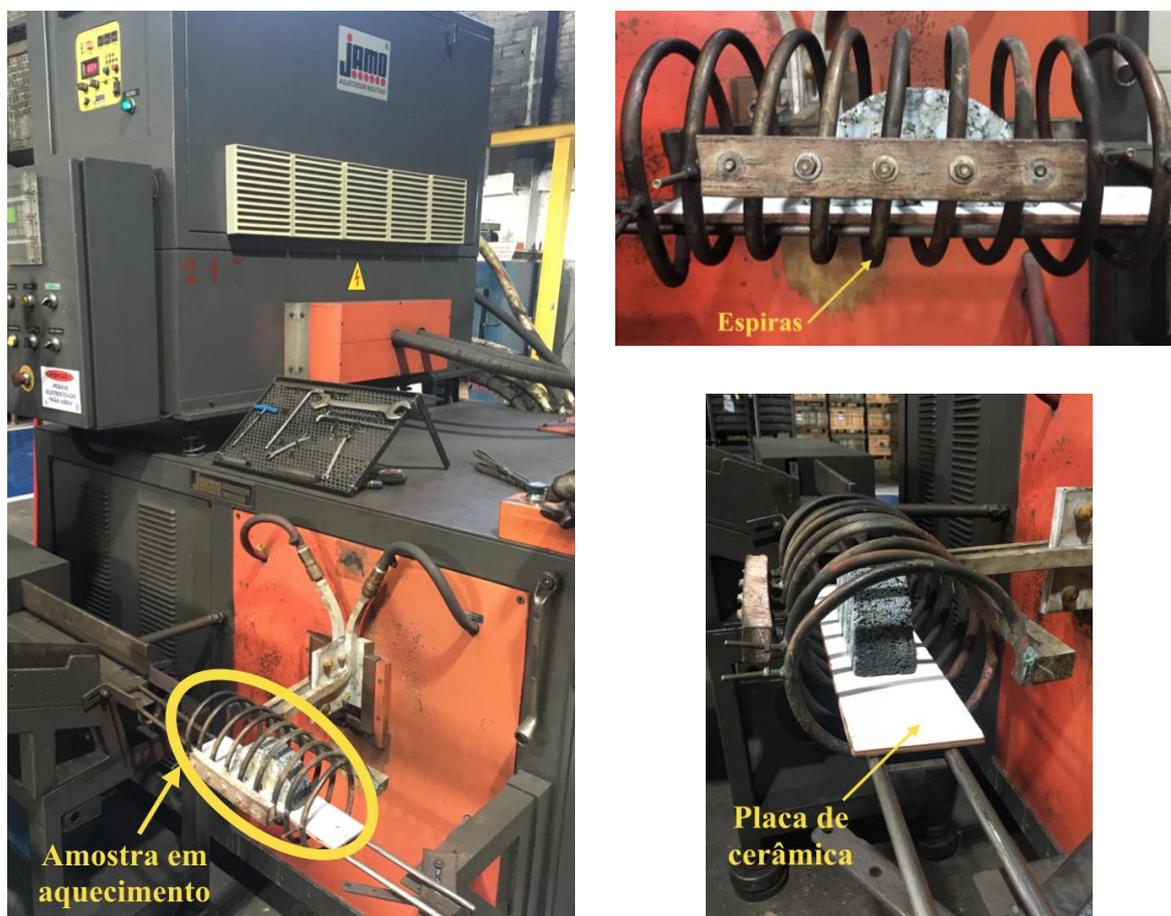
5.2.5 Indução do aquecimento

Para a realização do aquecimento as amostras já rompidas e envolvidas com a fita crepe foram levadas para a uma indústria de peças de caixas de transmissão de engrenagens na região metropolitana de Porto Alegre.

O equipamento de indução utilizado é da marca Jamo, composto por uma bobina de 135 mm de diâmetro formada por um conjunto de 9 espiras circulares, conforme mostrado na Figura 24. Para apoiar os CPs, foram feitas placas cerâmicas que, além de servirem de apoio, inibem

influência de aquecimento por condução devido aquecimento de peças que constituem o sistema da bobina da indutora. O aquecedor indutivo forneceu 195 kW de potência para aquecer as amostras.

Figura 24 – Sistema de aquecimento indutivo.



(fonte: o próprio autor)

Antes de serem colocados dentro do sistema de indução, retirou-se a fita que envolvia cada amostra para que a temperatura fosse monitorada com o auxílio da câmera termográfica. A câmera utilizada é da marca FLIR modelo T440. Optou-se por registrar as imagens quando a temperatura das amostras atingia a temperatura máxima de aquecimento selecionada, que era aproximadamente 85°C, baseado em Liu (2012), Liu *et al.* (2012) e Liu *et al.* (2013), para que fosse avaliada a região onde mais havia aquecimento do CP no formato semicircular (Figura 25). O tempo de aquecimento de cada amostra foi o suficiente somente para que a temperatura

máxima fosse atingida. Depois de constatado que se chegou no aquecimento desejado, o sistema era desligado e o CP retirado da indutora.

Figura 25 – Amostra durante aquecimento com temperatura controlada com auxílio de câmera termográfica.



(fonte: o próprio autor)

Depois de aquecidas, as amostras foram novamente envolvidas com fita crepe para que se mantivessem intactas durante o deslocamento de retorno ao LAPAV, onde os CPs foram colocados dentro de câmara com temperatura controlada de 20°C até que fossem novamente rompidos, seguindo o mesmo protocolo descrito no item 5.2.4.

6 ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Nesta parte do trabalho serão apresentados os resultados gerados na pesquisa, antes, durante e depois do aquecimento induzido das amostras ensaiadas. Serão apresentadas análises dos dados obtidos para os CPs nas duas situações criadas na pesquisa: a primeira quando o *induction healing* foi aplicado no momento em que a carga máxima registrada reduziu em 20% depois do pico e a segunda, quando houve a ruptura praticamente total das amostras.

6.1 VOLUME DE VAZIOS

Na Tabela 8 estão sendo apresentados os volumes de vazios (Vv) encontrados nas amostras moldadas no Compactador Giratório. Conforme a norma DNIT 031 (2006) a camada de rolamento deve possuir volume de vazios entre 3% e 5%, então os CPs que foram posteriormente submetidos ao processo de serragem estão dentro dos limites normativos.

Tabela 8 – Resultados dos volumes de vazios obtidos na moldagem

	Vv (%)
CP <i>Superpave</i> 1	3,6
CP <i>Superpave</i> 2	3,8
CP <i>Superpave</i> 3	3,6
CP <i>Superpave</i> 4	3,3
CP <i>Superpave</i> 5	3,3

(fonte: o próprio autor)

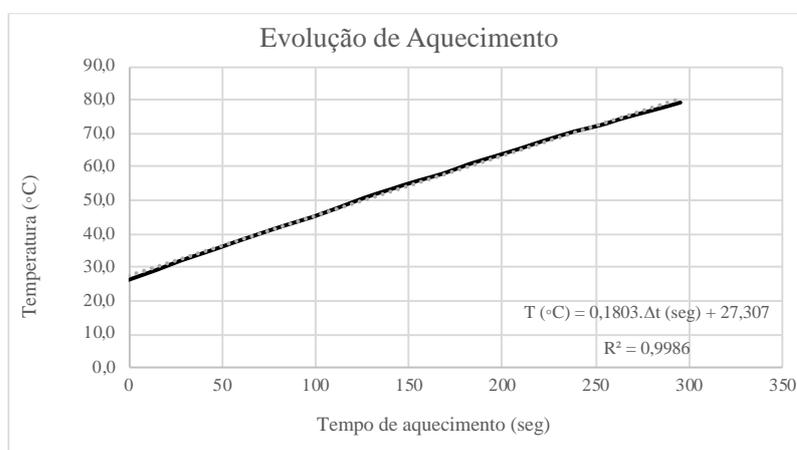
6.2 TEMPERATURAS ALCANÇADAS

Ao analisar a Figura 26, obtida pela compilação das temperaturas máximas registradas na superfície do CP1, com auxílio do *software* da câmera termográfica, pode-se perceber que a configuração utilizada com fornecimento contínuo de 195 kW durante o aquecimento há um ganho de linear de temperatura a uma taxa de 0,18. Na Figura 26 também é mostrada a equação do acréscimo de temperatura em graus Celsius em relação ao tempo em segundos. No ApêndiceA é apresentado o relatório gerado com as imagens capturadas do CP1, as quais foram

utilizadas para gerar a reta ilustrada na Figura 26, também são mostradas as temperaturas máximas e tempo do aquecimento obtidas em cada *frame*.

Sabe-se que quanto menor for o tempo de interrupção do tráfego de uma via para realização de obras de restauração ou reconstrução do pavimento, melhor é para o usuário e para economia devido o transporte de mercadorias através deste modal ser o mais expressivo. Com isso, tem-se em mente a realização de estudos de novas configurações de indução em trabalhos futuros, visando otimizar ainda mais o processo de cura induzida de misturas asfálticas.

Figura 26 – Representação da evolução da temperatura ao longo do tempo de aquecimento para uma potência de 195 kW.



(fonte: o próprio autor)

Segundo Liu *et al.* (2011), o aumento de temperatura do concreto asfáltico com adição de fibras metálicas possui influência direta com relação à distância da bobina e ao material em aquecimento. De maneira análoga, García *et al.* (2009) comprovaram que fatores que também influenciam a taxa de aquecimento é a quantidade de fibras incorporadas à mistura e a resistividade do material condutor. Como o objetivo principal desta pesquisa não foi a avaliação de diferentes distâncias e tempos de aquecimento, então não foi realizada variação da potência ou da distância das espiras em relação às amostras aquecidas para verificação da influência destas variáveis. Na Tabela 9 são apresentados os tempos de aquecimento e as temperaturas máximas atingidas por cada amostra durante a indução eletromagnética e no Apêndice B é apresentado o relatório gerado pelo *software* da câmera termográfica com as imagens e localização da temperatura máxima em cada corpo de prova.

Tabela 9 – Tempo de aquecimento e temperaturas máximas atingidas por cada amostra ensaiada.

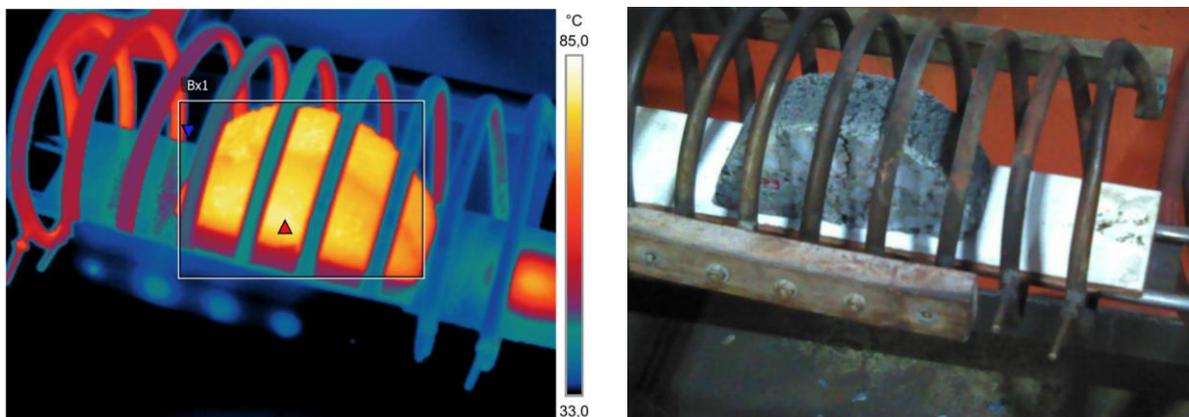
	Tempo de aquecimento (seg)	T _{máx} (°C)
CP1	296	80,6
CP2	302	81,7
CP3	301	81,6
CP4	304	82,2
CP5	299	81,2
CP6	306	82,5
CP7	296	80,7
CP8	296	80,7
Média	300	81,4
Desvio Padrão	4	0,7

(fonte: o próprio autor)

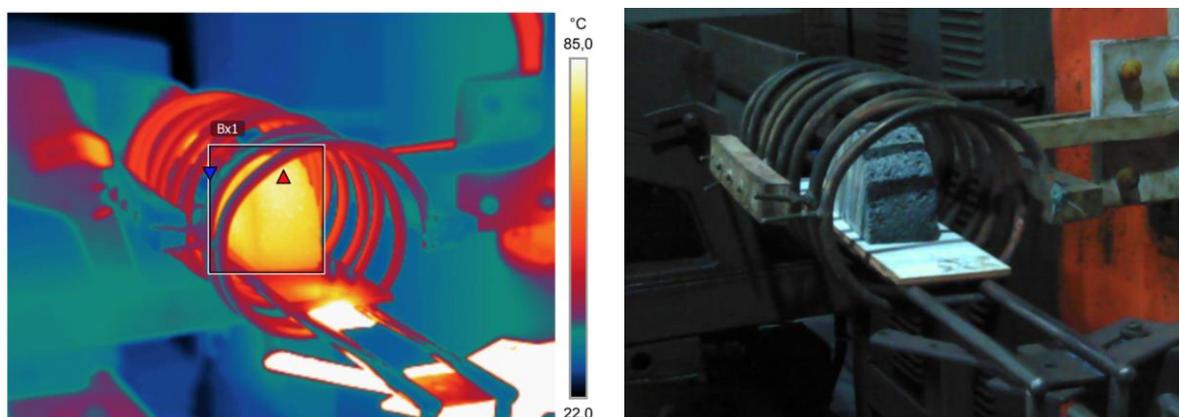
Em relação ao aquecimento dos corpos de prova, ao analisar as Figuras 27 (a) e (b), percebeu-se que as regiões onde houve maior concentração de temperaturas mais elevadas foi na região central superior e no centro das faces laterais, onde deve haver a maior concentração de limalha. Devido a impossibilidade de medir o aquecimento na face inferior, não se sabe como foi a resposta desta região em relação ao ganho de energia.

Figura 27 – Amostras aquecidas à temperatura máxima estipulada.

- (a) – Vista lateral da face lateral da amostra em imagem termográfica (esquerda) e da imagem digital (direita) ambas capturadas pela câmera FLIR.



(b) – Vista do interior da bobina em imagem termográfica (esquerda) e da imagem digital (direita) ambas capturadas pela câmera FLIR.



(fonte: o próprio autor)

Nas Figuras 27 (a) e (b), por meio do *software* da própria FLIR, foram marcados retângulos setorizando as regiões onde se encontram os CPs em aquecimento. Dentro destes retângulos, os pontos mais aquecidos indicados pelo *software* foram as setas identificadas pela cor vermelha, comprovando as zonas mais quentes da superfície descritas anteriormente. De forma análoga, as setas azuis indicam os pontos mais frios dentro de cada demarcação. Comprova-se que o ganho de temperatura se deu por forma de indução eletromagnética da limalha e não por condução uma vez que as regiões demarcadas como mais aquecidas foram superfícies das próprias amostras e não das espiras do aquecedor indutivo. Nos relatórios apresentados no Apêndice B pode-se visualizar os parâmetros medidos pela câmera para cada corpo de prova ensaiado, assim como as imagens termográficas.

6.3 HEALING POR COMPARAÇÃO COM $F_{m\acute{a}x}$

Conforme descrito na Equação 3, para avaliação da eficiência do *induction healing* (Sh) em misturas asfálticas, baseado em Liu *et al.*(2013); G-Meijide *et al.* (2016); N-Conteras, García (2016); Dai *et al.* (2013), este parâmetro é calculado pela razão entre a carga máxima alcançada pela amostra antes e depois do seu aquecimento. As Tabelas 10 e 11 mostram os resultados de eficiência de *healing* alcançados para a mistura de referência com adição de 10% de limalha de aço em relação ao peso do ligante.

Em relação à mistura de referência de Godoi (2017), o pico de carga em média com a adição de fibras, que foi o parâmetro utilizado como base para quantificar a capacidade de *healing* da mistura, não indicou redução com a adição da limalha. Enquanto Godoi (2017) encontrou valor médio de $F_{m\acute{a}x}$ igual a 3,04 kN para a mistura de referência, no presente trabalho houve como resultado médio para $F_{m\acute{a}x}$ igual a 3,21 kN, antes do aquecimento das amostras, mostrando que este parâmetro não apresentou redução com a adição de fibras.

Tabela 10 – Força máxima alcançada antes e depois do aquecimento em amostras no ensaio SCB interrompido em 20% a menos da carga máxima obtida e eficiência do *healing* nesta condição.

	F_{máx}	F_{máx}	Sh (%)
	(kN)	(kN)	
	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento	
CP1	3,07	2,20	71,9%
CP2	3,08	2,69	87,5%
CP3	3,21	2,96	92,3%
CP4	3,27	2,63	80,6%
Média	3,16	2,62	83,0%
Desvio Padrão	0,10	0,31	8,9%

(fonte: o próprio autor)

Tabela 11 – Força máxima alcançada antes e depois do aquecimento em amostras com ruptura levadas até o limite de sua capacidade de resistência no ensaio SCB e eficiência do *healing* nesta condição.

	F_{máx}	F_{máx}	Sh (%)
	(kN)	(kN)	
	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento	
CP5	2,95	2,28	77,2%
CP6	3,58	2,54	71,0%
CP7	3,34	2,55	76,4%
CP8	3,16	2,63	83,2%
Média	3,26	2,50	77,0%
Desvio Padrão	0,27	0,15	5,0%

(fonte: o próprio autor)

Ao comparar os resultados de eficiência de *healing* alcançados com o aquecimento aplicado com 20% a menos da força máxima resistida e após ruptura quase total das amostras, percebe-

se que, existe uma diferença na eficiência média encontrada, sendo 83,0% para o primeiro caso e 77,0% para o segundo. Dessa forma, a aplicação de alguma intervenção de recuperação quando o concreto asfáltico ainda não sofreu um dano maior resulta em maior efeito da indução à recuperação por aquecimento, podendo prolongar sua vida útil ainda mais.

Na Tabela 12 são mostradas as taxas de *healing* obtidas nas pesquisas utilizadas como referência para cálculo do Sh e também os valores encontrados para o presente trabalho.

Tabela 12 – Comparação de healing médio.

Pesquisa	Material Condutor	Quantidade de material condutor *	Healing médio (Sh %)
Liu <i>et al.</i> (2013)	Fibra de aço	4%	64,3
Liu <i>et al.</i> (2013)	Lã de aço	4%	64,8
G-Meijide <i>et al.</i> (2016)	Grão metálico	11,2%	92,3
N-Conteras, García (2016)	Fibras de aço	4%	72,0
Dai <i>et al.</i> (2013)	Lã de aço	8%	97,6
Ruptura parcial - Aragão (2019)	Limalha de aço	10%	83,0
Ruptura total - Aragão (2019)	Limalha de aço	10%	77,0

* A relação da porcentagem do material condutor varia para cada pesquisa.

(fonte: o próprio autor)

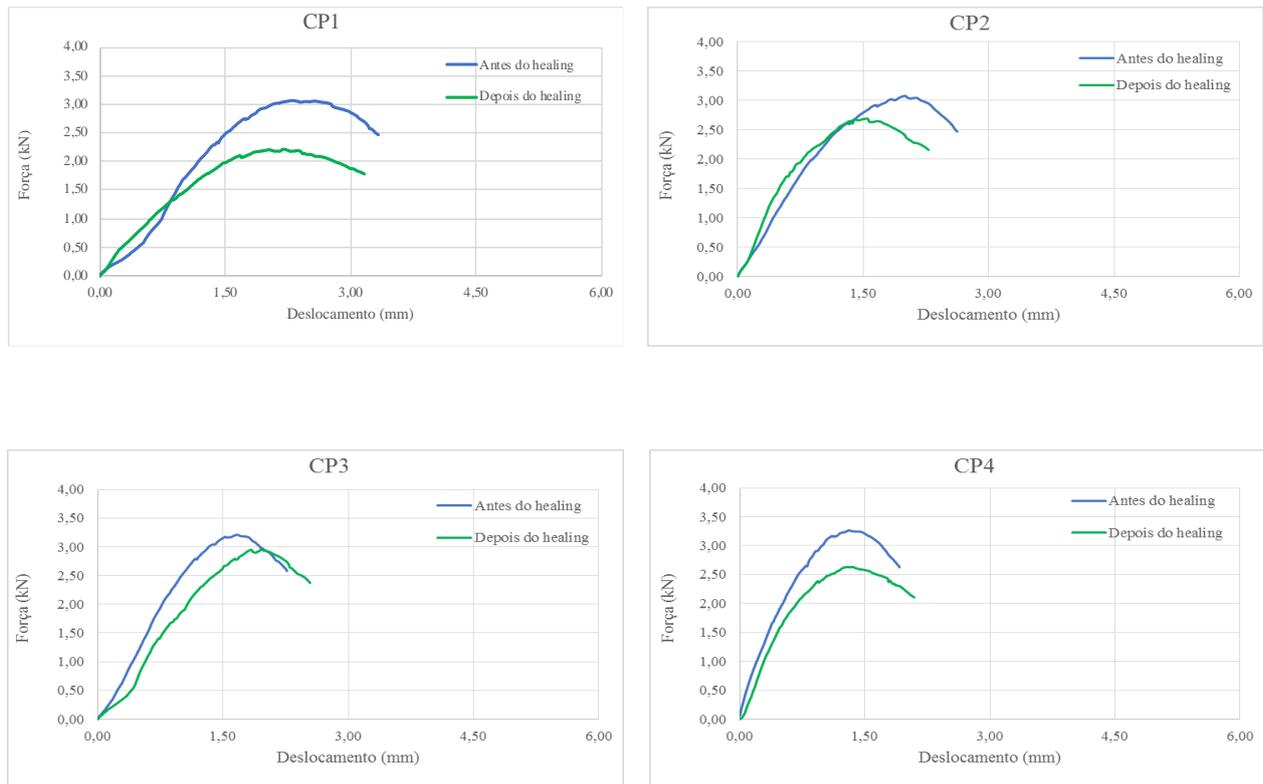
Ao comparar as taxas de *healing* obtidas a partir das amostras com a limalha de aço e as referências que utilizaram o mesmo método de cálculo de Sh porém diferentes tipos de material condutor, observou-se que: ambas as pesquisas com fibras de aço, alcançaram níveis de recuperação inferiores do que com a utilização de limalha; em relação ao uso do grão metálico, a limalha também resultou em maior índice de recuperação da sua resistência; já os trabalhos com lã de aço apresentaram uma grande disparidade em relação à taxa Sh, uma foi superior e outra inferior em comparação com o uso da limalha.

6.4 RESULTADOS SCB

Como parte do procedimento do ensaio SCB para o primeiro critério de finalização do carregamento, quando houve redução em 20% da carga máxima registrada pela MTS, obteve-

se as curvas apresentadas nas Figuras 28. A partir das curvas apresentadas e dos dados de saída dos ensaios, calculou-se os parâmetros que estão sendo apresentados nas Tabelas 13 (a) e (b).

Figura 28 – Curvas Força vs. Deslocamento antes e depois de induzido o aquecimento para o primeiro critério de aplicação do *healing*.



(fonte: o próprio autor)

Para este tipo de ensaio, ademais da deformação máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x,i}$), deslocamento vertical máximo (ΔW_i) e tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$), utiliza-se as informações da rampa de descida da curva para calcular o Trabalho de Fratura (W_f), Energia de Fratura (G_f) e índice de flexibilidade (FI). Entretanto, como o primeiro critério de interrupção do carregamento impossibilita o cálculo destes parâmetros, para estes CPs realizou-se somente os cálculos de W_f e G_f , considerando a área do gráfico até o pico de carregamento.

Tabela 13 – Resultados dos parâmetros calculados para aplicação do healing quando $F_{m\acute{a}x}$ reduziu em 20%.

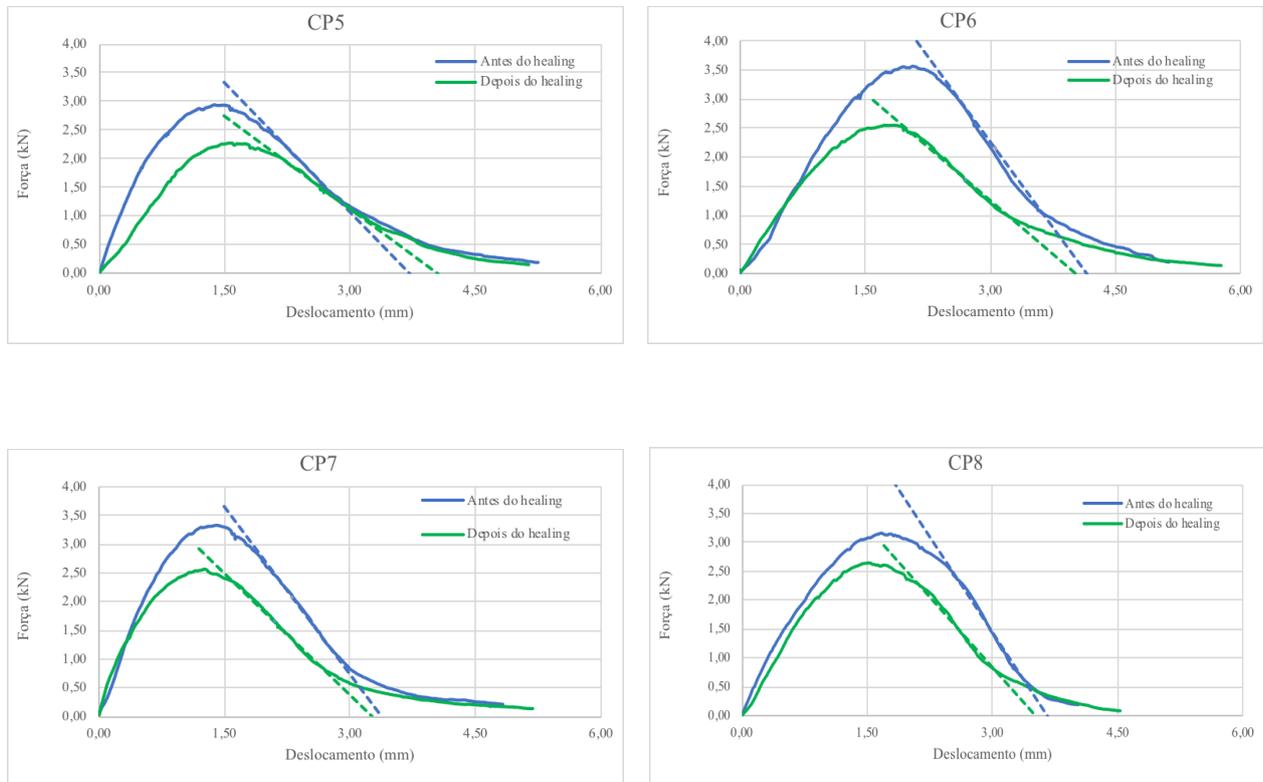
	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (%)		Deslocamento $F_{m\acute{a}x}$ (mm)		Tensão máxima (N/mm ²)	
	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento
CP1	4,04	2,90	3,07	2,20	1,78	1,28
CP2	2,71	2,08	2,01	1,54	1,65	1,44
CP3	2,23	2,62	1,67	1,97	1,72	1,59
CP4	1,75	1,71	1,32	1,28	1,75	1,41
Média	2,68	2,33	2,02	1,75	1,73	1,43
Desvio Padrão	0,98	0,53	0,76	0,41	0,06	0,13

	Wf (J)		Gf (J/m ²)		Gf_{depois} / Gf_{antes} (%)
	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento	
CP1	4,02	3,16	1242,9	975,8	78,5%
CP2	3,91	2,72	1151,7	802,4	69,7%
CP3	3,23	2,89	951,5	852,2	89,6%
CP4	2,85	2,17	825,9	629,9	76,3%
Média	3,50	2,73	1043,0	815,1	78,5%
Desvio Padrão	0,56	0,42	189,1	143,4	8,3%

(fonte: o próprio autor)

Percebe-se que para os CPs 1 e 2 o início do carregamento depois do *healing* possui um comportamento mais rígido quando comparado com as curvas antes do carregamento, indicado pela rampa da curva ser mais inclinada verticalmente, porém ao se aproximar do pico de carga a mistura se mostra menos rígida do que antes. Já para as curvas obtidas pela ruptura dos CPs 3 e 4, a mistura depois do aquecimento induzido já aparenta necessitar de maiores deslocamentos para aplicação de uma mesma força. Em relação à energia de fratura, para todas as amostras ela se mostrou menor depois do *healing* mostrando que, apesar de visualmente selar a trinca, a mistura asfáltica não possui a mesma capacidade de resistir à propagação da fissura. Já para os corpos de prova em que o aquecimento foi aplicado quando o carregamento chegou a ao final da resistência suportada por eles, foi possível calcular os demais parâmetros da mistura que dependem da rampa de descida da carga. Na Figura 29 são apresentadas as curvas obtidas pelo ensaio SCB com ruptura total das amostras.

Figura 29 – Curvas Força vs. Deslocamento antes e depois de induzido o aquecimento para o segundo critério de aplicação do *healing*.



(fonte: o próprio autor)

Com base nas curvas apresentadas na Figura 29 foi possível realizar os cálculos dos parâmetros apresentados nas Tabelas 14 (a) e (b). Diferente do primeiro critério de aplicação do aquecimento, estas curvas permitiram a obtenção da reta que tangencia o ponto de inflexão da rampa de descida ($|m|$) e da energia de fratura (G_f) requisitada durante o rompimento de cada CP, dessa vez resultando nos índices de fissuração (FI) apresentados na Tabela 14 (b).

Tabela 14 – Resultados dos parâmetros calculados para aplicação do healing quando $F_{m\acute{a}x}$ atingiu aproximadamente 0,1 kN.

	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (%)		Deslocamento $F_{m\acute{a}x}$ (mm)		Tensão máxima (N/mm ²)	
	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento
	CP5	1,84	2,07	1,38	1,56	1,58
CP6	2,70	2,26	2,08	1,74	1,92	1,36
CP7	1,83	1,65	1,41	1,27	2,02	1,54
CP8	2,26	2,05	1,68	1,52	1,76	1,47
Média	2,16	2,01	1,64	1,52	1,82	1,40
Desvio Padrão	0,41	0,26	0,32	0,19	0,19	0,14

	Wf (J)		Gf (J/m ²)		$G_{f_{depois}} / G_{f_{antes}}$ (%)
	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento	
	CP5	7,48	5,79	2172,3	
CP6	9,08	6,55	2557,8	1845,4	72,1%
CP7	7,37	5,48	2339,0	1741,8	74,5%
CP8	7,39	5,77	2263,0	1767,8	78,1%
Média	7,83	5,90	2333,0	1758,7	75,5%
Desvio Padrão	0,84	0,46	164,6	68,6	2,7%

(fonte: o próprio autor)

De maneira similar ao primeiro critério, depois da aplicação do *healing* dois corpos de prova se mostraram mais rígidos quando comparados com o primeiro rompimento, CPs 6 e 7, indicado pela rampa de subida do carregamento estar mais inclinada. Porém, logo em seguida as curvas indicaram que as misturas depois do aquecimento induzido se comportaram de maneira mais dúctil. Em se tratando da Energia de Fratura (Gf), os CPs seguiram o mesmo comportamento indicado anteriormente pelas curvas da Figura 28, apresentando uma redução em relação a antes do *healing*, fortalecendo a ideia de que apesar da trinca estar selada, ela não possui a mesma capacidade de resistir à propagação da fissura. Ao comparar os valores médios de Gf antes e depois do *healing* aplicado, percebe-se que há uma expressiva recuperação deste parâmetro, em média 75,5%. Não foi possível estabelecer uma comparação com a recuperação média entre a Energia de Fratura para os dois critérios, pois o segundo muniu-se de uma análise mais detalhada tendo em vista que a área do gráfico foi superior do que o primeiro critério.

Na Tabela 15 estão sendo apresentados os resultados dos parâmetros $|m|$ e FI, ao quais puderam ser calculados por meio dos dados obtidos a partir da segunda parte da curva força x deslocamento.

Tabela 15 – Resultados de $|m|$ e FI obtidos pelo ensaio SCB.

	$ m $		FI	
	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento	Antes do aquecimento	Depois do aquecimento
CP5	1,50	1,07	14,48	15,70
CP6	1,96	1,22	13,02	15,08
CP7	1,94	1,42	12,07	12,24
CP8	2,18	1,62	10,37	10,89
Média	1,90	1,33	12,49	13,48
Desvio Padrão	0,29	0,24	1,72	2,29

(fonte: o próprio autor)

Em relação ao parâmetro $|m|$ todas as amostras tiveram seus valores reduzidos depois do *healing*, ou seja, a inclinação da tangente ao ponto de inflexão da zona de descarregamento da curva se mostrou menos inclinada. A redução nos valores de $|m|$ indica que a mistura após indução do seu aquecimento se torna mais dúctil do que antes, requisitando maiores deformações para resistir a uma mesma carga, esse comportamento deve se dar por uma não selagem completa das fissuras no interior das amostras, fazendo com que a mistura asfáltica não possua a mesma capacidade de resistir à propagação das trincas. O mesmo comportamento pode ser visualizado ao analisar os valores médios de FI, o qual possui maior resultado após o *healing*.

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo do trabalho serão apresentadas as conclusões e considerações finais referente à pesquisa realizada, cujo enfoque foi realizar a avaliação do *induction healing* através de aquecimento induzido em misturas asfálticas com adição de 10% de limalha de aço originada de processo de fabricação de objetos cutelaria. Ademais disso, serão propostas sugestões de trabalhos futuros a partir de aspectos estudados ao longo do trabalho.

7.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos por meio do ensaio SCB em misturas com adição de fibras antes e depois do aquecimento induzido, assim como das imagens capturadas pela câmera termográfica, pode-se estabelecer as seguintes conclusões:

- ao analisar as imagens termográficas geradas pela câmera utilizada, concluiu-se que o aquecimento de amostras através de indução eletromagnética com indutora de espiras circulares a uma taxa de fornecimento de potência constante, origina um aquecimento da mistura também constante;
- ao realizar a comparação dos dois critérios de aplicação do aquecimento induzido, percebeu-se que ao aquecer o concreto asfáltico quando este ainda não se apresenta em elevado estado de degradação, ou seja, sem a presença de grandes fissuras, ele se mostrou mais propício a se regenerar por meio de *induction healing*. Essa característica se confirmou devido a carga máxima resistida pelas amostras de acordo com o primeiro critério de interrupção do ensaio (20% a menos do que a carga máxima registrada) recupera-se a uma taxa de 83,0%, ao passo que o *induction healing* aplicado quando há a perda quase total da resistência à propagação de trincas regenerou 77,0% em relação a antes do seu aquecimento;
- por meio da análise das curvas originadas pelo ensaio SCB para ambos os critérios de indução do *healing*, percebeu-se que em metade das amostras depois de aquecidas o início do carregamento indicou comportamento mais elástico da mistura;
- comparando as energias de fratura (G_f) calculadas para os gráficos onde as curvas possuem a rampa de descida completa, percebeu-se que houve recuperação média

de 75,5% deste parâmetro, o que permite verificar que apesar das trincas estarem seladas e visualmente imperceptíveis, as amostras não possuem a mesma energia armazenada para resistir à propagação de fissuras;

- em relação à ductilidade da mistura, o parâmetro $|m|$ apontou que a mistura se torna mais dúctil depois do *induction healing*, ilustrado por todas as curvas apresentarem menor inclinação da rampa de descarregamento após pico de carga. Pôde-se reiterar esse comportamento ao comparar os valores do índice de flexibilidade (FI) antes e depois do aquecimento, os quais indicaram maior flexibilidade depois do *healing* para todas as amostras ensaiadas;
- ainda é muito difícil de avaliar a recuperação dos parâmetros analisados nesta pesquisa somente devido o *induction healing*, pois existe um período em que a própria capacidade da mistura se regenerar se faz presente. Entretanto, é bastante significativo o ganho de aquecimento de misturas asfálticas com adição de apenas 10% em relação ao peso do ligante em um curto período de tempo, aproximadamente 5 minutos;
- em relação à mistura de referência o estudo com adição da limalha não indicou redução na resistência máxima alcançada, ou seja, colocar limalha na proporção de 10% não implicou em perda quanto à capacidade máxima de resistir ao trincamento;
- ao comparar as taxas de *healing* obtidas com a limalha de aço e os outros materiais condutores por meio de pesquisas de referência, se mostrou bastante promissor o uso da limalha, uma vez que é um resíduo industrial sem valor comercial que gerou uma recuperação da mistura asfáltica em proporção significativa em relação a utilização de outros materiais condutores usados em estudos realizados em outros estudos.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta de trabalhos futuros para continuação da pesquisa, sugere-se:

- realização de ensaio de fadiga a 4 pontos para avaliação do incremento de vida útil do pavimento com a aplicação do *induction healing*;
- comparação do critério de interrupção do ensaio realizado neste trabalho com outras porcentagens em relação ao pico do carregamento para a indução do aquecimento;

- realização de novas configurações de tipo de aquecimento, tais como indução por meio de bobina com formato plano;
- execução de análise de distribuição da limalha dentro de amostras através de raios-x para verificação da homogeneidade da mistura;
- realização de estudo com aplicação de sucessivos aquecimentos para uma mesma mistura asfáltica.

REFERÊNCIAS

- ABOJARADEH, M. **Predictive Fatigue Models for Arizona Asphalt Concrete Mixtures**. p. 382. PhD Thesis, Arizona State University. EUA. 2003.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 105**: Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semi-Circular Bend Geometry (SCB), Washington, DC, 2013
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL. **ASTM D7460**. Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending. Philadelphia. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15573**: Misturas Asfálticas – Determinação da Densidade Aparente e da Massa Específica Aparente de Corpos de Prova Compactados. Rio de Janeiro, 2012.
- AYAR, P; MORENO-NAVARRO, F.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. **The Healing Capability of Asphalt Pavements: a State of the Art Review**. Journal of Cleaner Production, p. 28-40. Universidad de Granada. Espanha. 2015.
- BAZIN, P.; SOUNIER, J. **Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes**. Proceedings of the Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. p. 553-69. Michigan, Estados Unidos.1967.
- CASTRO, M.; SÁNCHEZ, J. **Fatigue and Healing of Asphalt Mixtures: Discriminate Analysis of Fatigue Curves**. Journal of Transportation Engineering. 2006.
- CAVALCANTI, L. S. **Efeito de Alguns Modificadores de Ligante na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- CERATTI, J. A.; NÚÑEZ, W. P.; BRITO, L. A. T. **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. Relatório Final de Pesquisas – CONCEPA/ANTT. 2014.
- DAI, Q.; WANG, Z.; HASAN, M. E. M. **Investigation of induction healing effects on electrically conductive asphalt mastic and asphalt concrete beams through fracture-healing tests**. Construction and Building Materials, p. 729 – 737. 2013.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031**: Pavimentos Flexíveis: Concreto Asfáltico: Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031/2006: Pavimentos Flexíveis: Concreto Asfáltico: Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro. 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 135/2010: Determinação de Módulo de Resiliência**. Rio de Janeiro. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136/2010: Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral**. Rio de Janeiro. 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 12697-44: Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt Part 44: Crack Propagation by Semi-Circular Bending Test**, Brussels, Belgium, 2010.

FONTOURA, E.; JACQUES, G. E.; COLPO, G. B.; GARCEZ, M. R.; BRITO, L. A. T. **Desenvolvimento e Caracterização Mecânica de Mistura Asfáltica com Limalha de Aço como Agente de Regeneração de Pavimentos**. 32º Congresso de Pesquisa em Transporte, Gramado – RS. 2018.

GARCEZ, M.; TAKIMI, A. S.; BRYKALSKI, M. **Production of self-healing asphalt with steel short fibres and microwave heating: pilot study**. Acta Scientiarum. Technology, v. 40. 2018.

GARCÍA, A. **Self-healing of open cracks in asphalt mastic**. Fuel. p. 264-272. 2012.

GARCÍA, A.; BUENO, M.; N-CONTRERAS, J.; PARTL, M. N. **Induction healing of dense asphalt concrete**. Construction and Building Materials. 2013.

GARCÍA, A.; N-CONTRERAS, J.; PARTL, M. N.; SCHUETZ, P. **Uniformity and mechanical properties of dense asphalt concrete with steel wool fibers**. Construction and Building Materials. 2013.

GARCÍA, A.; SCHLANGEN, E.; VAN DE VEN, M.; LIU, Q. **A Simple Model to Define Induction Heating in Asphalt Mastic**. Construction and Building Materials, p. 38-46. 2012.

GARCÍA, A.; SCHLANGEN, E.; VAN DE VEN, M.; LIU, Q. **Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers**. Construction and Building Materials, p. 3175 – 3181. 2009.

GARCÍA, A.; SCHLANGEN, E.; VAN DE VEN, M.; VAN BOCHOVE, G. **Optimization of composition and mixing process of a self-healing porous asphalt**. Construction and Building Materials. 2011.

GARCÍA, A.; SCHLANGEN, E.; VAN DE VEN, M.; VAN VLIET, D. **Induction heating of mastic containing conductive fibers and fillers**. Materials and Structures. p. 499-508. 2010.

GODOI, L.C. **Aplicação do Ensaio de Flexão em Amostra Semicircular para Avaliação de Trincamento de Misturas Asfálticas**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PPGEC/UFRGS. Porto Alegre. 2017.

GOMÉZ-MEIJIDE, B.; AJAM, H.; LASTRA-GONZÁLEZ, P.; GARCÍA, A. **Effect of Air Voids Content on Asphalt Self-Healing Via Induction and Infrared Heating**. Construction and Building Materials, p. 957-966. 2016.

LITTLE, D. N.; BHASIN, A. **Exploring Mechanism of Healing in Asphalt Mixtures and Quantifying its Impact**. S. van der Zwaag (ed.), Self Healing Materials. An Alternative Approach to 20 Centuries 205 of Materials Science. p. 205–218. Texas, Estados Unidos.

- LIU, Q. **Induction Healing of Porous Asphalt Concrete**. PhD dissertation - Delft University of Technology. Netherlands. 2012.
- LIU, Q.; SCHANGEN, E.; VAN DER VEN, M.; VAN BOCHOVE, G.; VAN MONTFORT, J. **Evaluation of the Induction Healing Effect of Porous Asphalt Concrete Through Four Point Bending Fatigue Test**. Construction and Building Materials, p. 403 – 409. 2012.
- LIU, Q.; SCHLANGEN, E.; GARCÍA, A.; VAN VE VEN, M. **Induction Heating of Electrically Conductive Porous Asphalt Concrete**. Construction and Building Materials, p. 1207-1213. 2010.
- LIU, Q.; WU, S.; SCHLANGEN, E. **Induction heating of asphalt mastic for crack control**. Construction and Building Materials.p. 345 – 351. 2013.
- MELLO, L. G. R. **A Teoria do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de Brasília. Brasília. 2008.
- MENSCH, N. G. **Análise viscoelástica de misturas a quentes e mornas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PPGEC/UFRGS. Porto Alegre. 2017.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL. **Transportes no Brasil – Síntese Histórica**. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/conteudo/136-transportes-no-brasil-sintese-historica>>. Publicado em 2014.
- MOLENAAR, A.A.A.; SCARPAS, A.; LIU, X.; ERKENS, S.M.J.G. **Semi-circular bending test; Simple but useful**. Journal of Association of Asphalt Paving Technologies, Vol. 71, 2002.
- N-CONTRERAS, J.; GARCÍA, A. **Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating**. Materials and Design. 2016.
- PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
- PLANCHE, J.-P.; ANDERSON, D. A.; GAUTHIER, G.; LE HIR, Y. M.; MARTIN, D. **Evaluation on Fatigue Properties of Bituminous Binders**. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 37, p. 356-359, 2004.
- RUDOLF, R. ; MITSCHANG, P.; NEITZEL, M. **Induction heating of continuous carbon-fibre-reinforced thermoplastics**. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2000.
- SAHA, G.; BILIGIRI, K.P. **Fracture properties of asphalt mixtures using semi-circular bending test: A state-of-the-art review and future research**. Construction and Building Materials, 105, p. 103-112, 2016.
- SHEN, S.; SHIU; H-M; HUANG, H. **Characterization of Fatigue and Healing in Asphalt Binders**. Journal of Materials in Civil Engineering, p. 846-852, 2010.

TANG, J.; LIU, Q.; WU, S.; YE, Q.; SUN, Y. **Schlangen, E. Investigation of the optimal self-healing temperatures and healing time of asphalt binders.** Construction and Building Materials, p. 1029–1033. 2016.

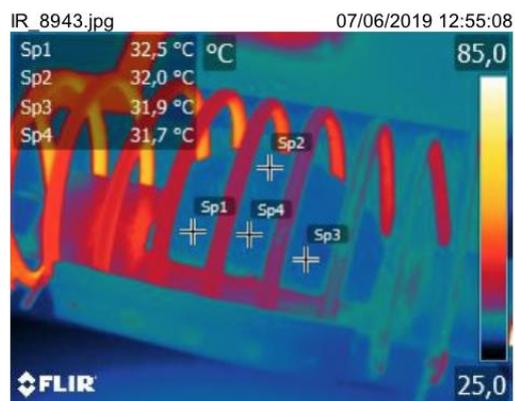
UCHIDA, K.; KUROKAWA, T.; HIMENO, K.; NISIZAWA, T. **Healing characteristics of asphalt mixture under high temperature condition.** Ninth International Conference on Asphalt Pavements. Copenhagen, Dinamarca. 2002.

WU, R.; TSAI, B.W.; HARVEY, J. **Using four-point bending tests in calibration of the California mechanistic-empirical pavement design system.** 2009.

APÊNDICE A – RELATÓRIO DE EVOLUÇÃO DE AQUECIMENTO

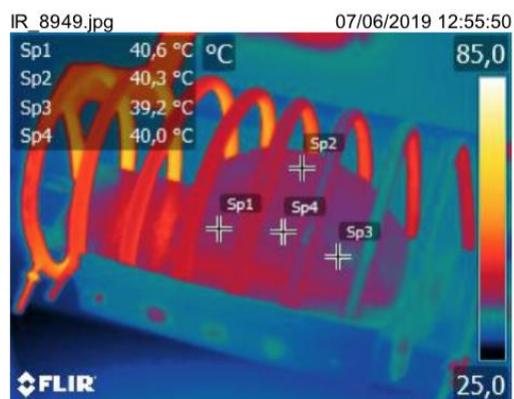


APÊNDICE A - EVOLUÇÃO DE AQUECIMENTO



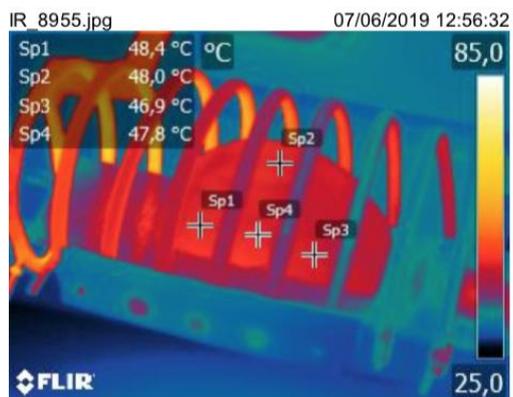
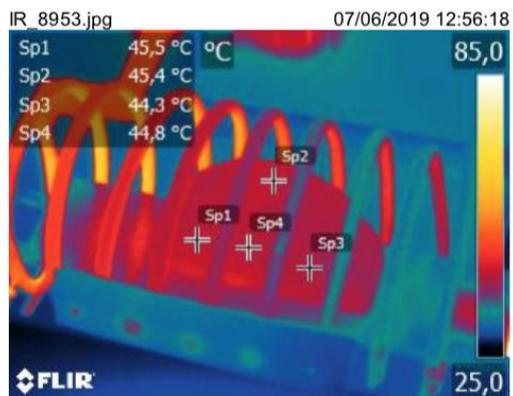
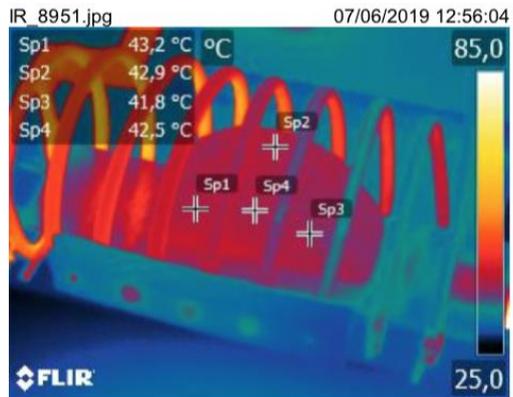


APÊNDICE A - EVOLUÇÃO DE AQUECIMENTO



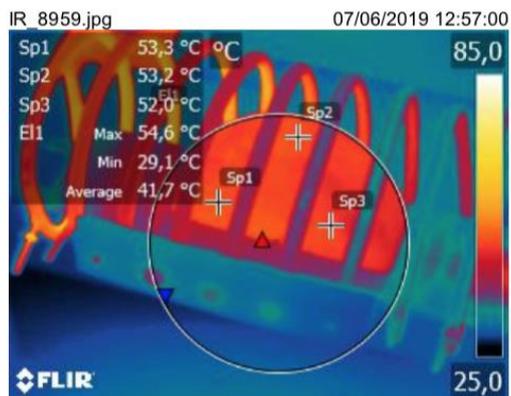
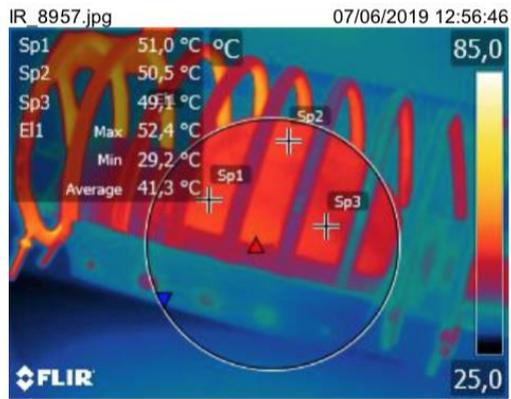


APÊNDICE A - EVOLUÇÃO DE AQUECIMENTO



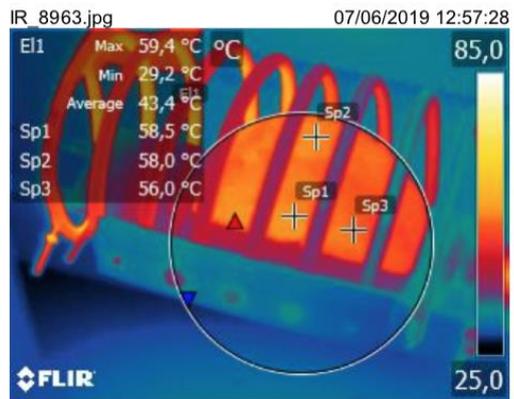


APÊNDICE A - EVOLUÇÃO DE AQUECIMENTO



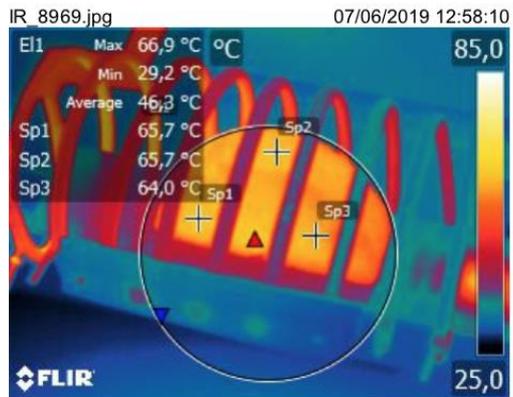


APÊNDICE A - EVOLUÇÃO DE AQUECIMENTO





APÊNDICE A - EVOLUÇÃO DE AQUECIMENTO





APÊNDICE A - EVOLUÇÃO DE AQUECIMENTO





APÊNDICE A - EVOLUÇÃO DE AQUECIMENTO



**APÊNDICE B – RELATÓRIO DE IMAGENS TERMOGRÁFICAS DE
AMOSTRAS AQUECIDAS**



APÊNDICE B - RELATÓRIO DE AQUECIMENTO

Measurements

Bx1	Max	80,6 °C
	Min	33,3 °C
	Average	59,3 °C
Dt1 3x1.Max - Ref. temp.		80,6 °C

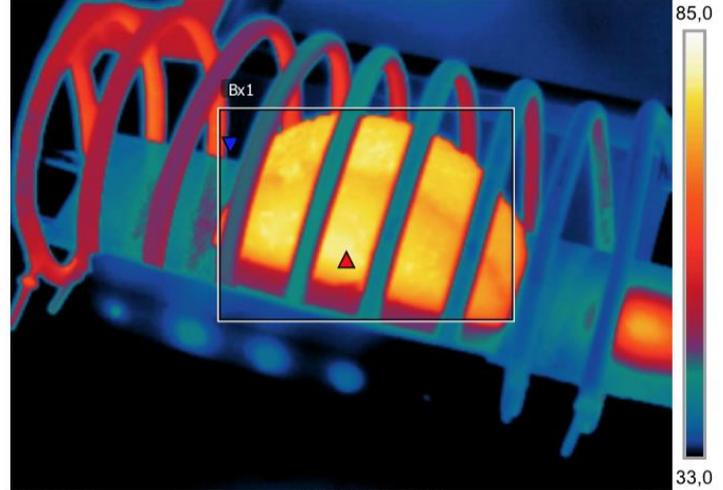
Parameters

Emissivity	0.97
Refl. temp.	23 °C
Distance	1 m
Atmospheric temp.	23 °C
Ext. optics temp.	23 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	57 %

Note

CP_01

07/06/2019 12:59:35



IR_8981.jpg

FLIR T440 (incl Wi-

62100816

07/06/2019 12:59:35



DC_8982.jpg



APÊNDICE B - RELATÓRIO DE AQUECIMENTO

Measurements

Bx1	Max	81,7 °C
	Min	31,2 °C
	Average	49,9 °C

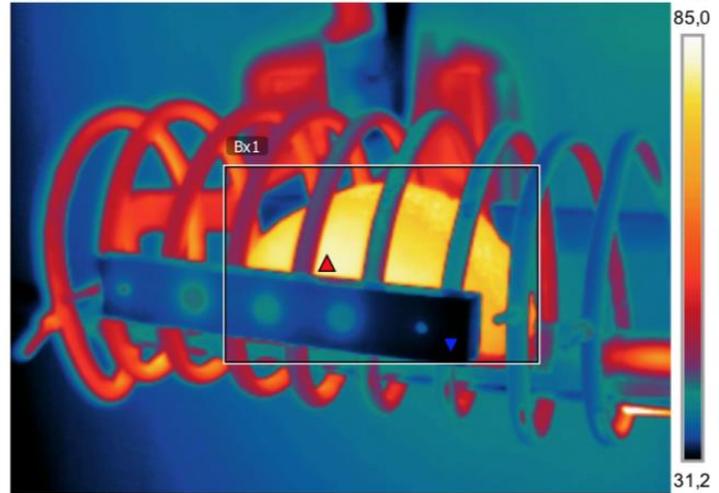
Parameters

Emissivity	0.97
Refl. temp.	23 °C
Distance	1 m
Atmospheric temp.	23 °C
Ext. optics temp.	23 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	57 %

Note

CP_02

07/06/2019 12:22:28



IR_8719.jpg

FLIR T440 (incl Wi-

62100816

07/06/2019 12:22:28



DC_8720.jpg



APÊNDICE B - RELATÓRIO DE AQUECIMENTO

Measurements

Bx1	Max	81,6 °C
	Min	30,7 °C
	Average	50,6 °C

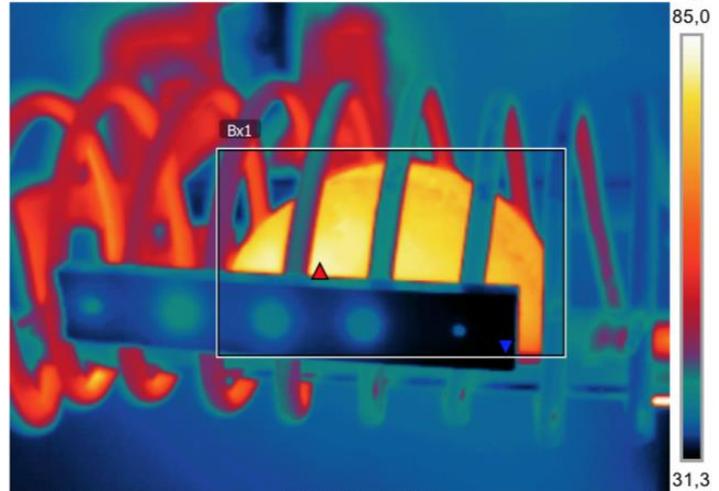
Parameters

Emissivity	0.97
Refl. temp.	23 °C
Distance	1 m
Atmospheric temp.	23 °C
Ext. optics temp.	23 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	57 %

Note

CP_03

07/06/2019 12:34:48



IR_8809.jpg

FLIR T440 (incl Wi-

62100816

07/06/2019 12:34:48



DC_8810.jpg

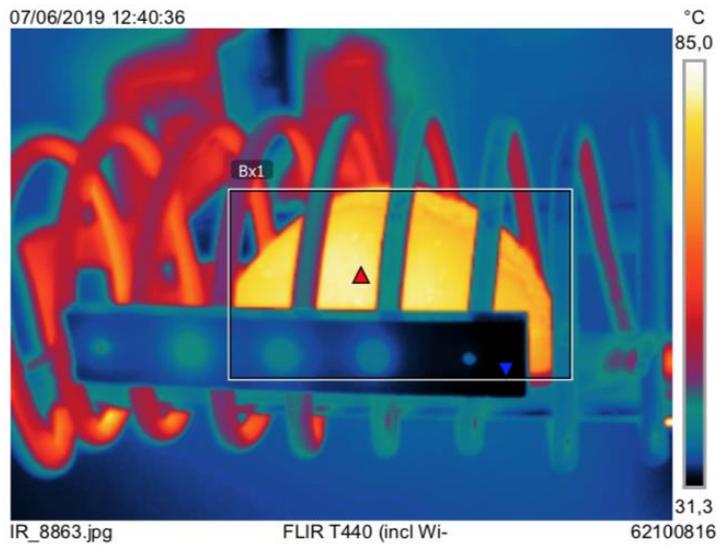


APÊNDICE B - RELATÓRIO DE AQUECIMENTO

Measurements		
Bx1	Max	82,2 °C
	Min	30,8 °C
	Average	52,4 °C

Parameters	
Emissivity	0.97
Refl. temp.	23 °C
Distance	1 m
Atmospheric temp.	23 °C
Ext. optics temp.	23 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	57 %

Note
CP_04





APÊNDICE B - RELATÓRIO DE AQUECIMENTO

Measurements

Bx1	Max	81,2 °C
	Min	33,3 °C
	Average	59,9 °C
Sp1		80,2 °C

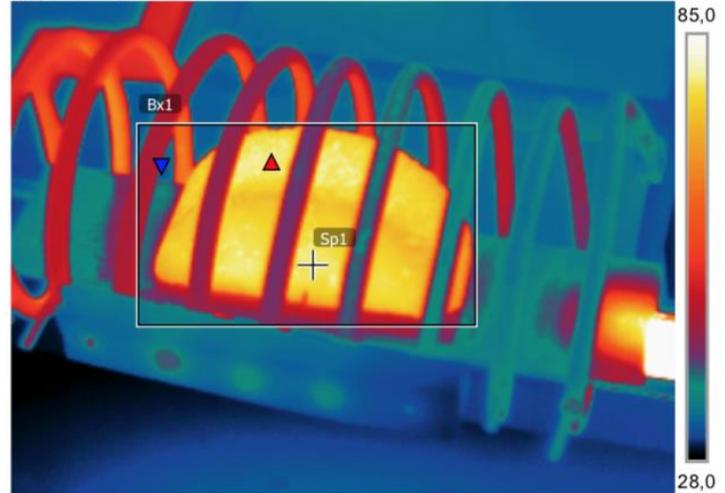
Parameters

Emissivity	0.97
Refl. temp.	23 °C
Distance	1 m
Atmospheric temp.	23 °C
Ext. optics temp.	23 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	57 %

Note

CP_05

07/06/2019 12:52:15



IR_8937.jpg

FLIR T440 (incl Wi-

62100816

07/06/2019 12:52:15



DC_8938.jpg

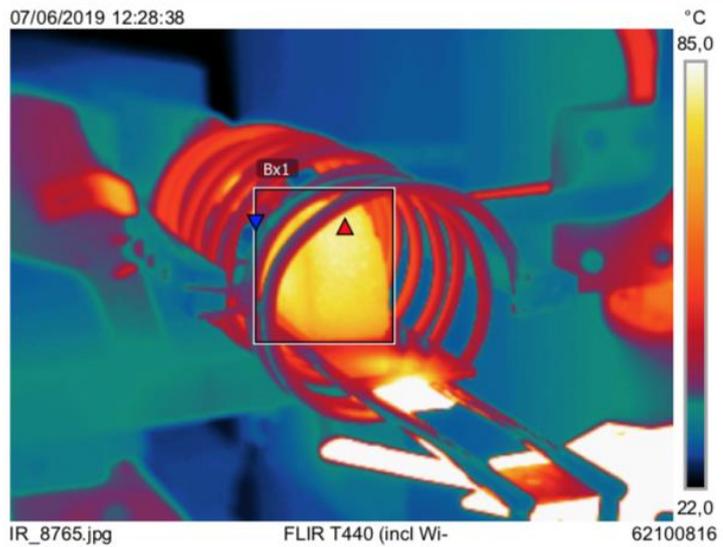


APÊNDICE B - RELATÓRIO DE AQUECIMENTO

Measurements		
Bx1	Max	82,5 °C
	Min	30,4 °C
	Average	62,8 °C

Parameters	
Emissivity	0.97
Refl. temp.	23 °C
Distance	1.5 m
Atmospheric temp.	23 °C
Ext. optics temp.	23 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	57 %

Note
CP_06





APÊNDICE B - RELATÓRIO DE AQUECIMENTO

Measurements

Bx1	Max	80,7 °C
	Min	32,5 °C
	Average	55,0 °C

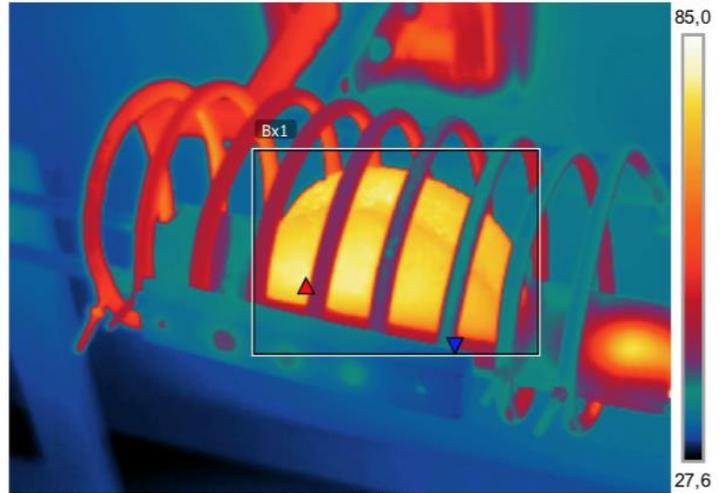
Parameters

Emissivity	0.97
Refl. temp.	23 °C
Distance	1 m
Atmospheric temp.	23 °C
Ext. optics temp.	23 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	57 %

Note

CP_07

07/06/2019 12:46:22



IR_8895.jpg

FLIR T440 (incl Wi-

62100816

07/06/2019 12:46:22



DC_8896.jpg



APÊNDICE B - RELATÓRIO DE AQUECIMENTO

Measurements		
Bx1	Max	80,7 °C
	Min	31,1 °C
	Average	50,5 °C

Parameters	
Emissivity	0.97
Refl. temp.	23 °C
Distance	1 m
Atmospheric temp.	23 °C
Ext. optics temp.	23 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	57 %

Note
CP_08

