FAACZ - FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CRISTIANO PESSOTTI DEL CARRO

GABRIEL ARAÚJO DOS SANTOS

LUCIANO WOTIKOSKI SARTORI

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FERRO FUNDIDO CINZENTO: FC 200 E FC 300

CRISTIANO PESSOTTI DEL CARRO GABRIEL ARAÚJO DOS SANTOS LUCIANO WOTIKOSKI SARTORI

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FERRO FUNDIDO CINZENTO: FC 200 E FC 300

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da FAACZ - Faculdades Integradas de Aracruz, como requisito parcial para obtenção do título de graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Artur Maioli.

CRISTIANO PESSOTTI DEL CARO GABRIEL ARAÚJO DOS SANTOS LUCIANO WOTIKOSKI SARTORI

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO FERRO FUNDIDO CINZENTO FC 200 E FC 300

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da FAACZ - Faculdades Integradas de Aracruz, como requisito parcial para obtenção do título de graduação em Engenharia Mecânica.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Me. Arthur Guimarães
FAACZ- Faculdades Integradas de Aracruz
Orientador

Prof. Me. João Paulo Calixto
FAACZ- Faculdades Integradas de Aracruz

Prof. Me. Leandro Bitti Instituto Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por seu infinito amor e por ter nos dados forças para chegarmos a essa etapa.

A nossas familias por todo apoio, paciência e carinho ao longo de todos esses anos.

Aos nossos amigos que estiveram ao nosso lado com companheirismo e sua constante ajuda.

A equipe do laboratório que nos ajudou a superar alguns desafios.

Ao nosso orientador por ter acreditado em nós e ter aceitado esse desafio.

A todos que contribuíram de maneira direta ou indiretamente e que de alguma forma, nos impulsionou a chegarmos na reta final.

"Inteligência e caráter: eis o objetivo da verdadeira educação" Martin Luther King

RESUMO

Os ferros fundidos cinzentos são utilizados em diversos segmentos industriais que requerem uma boa dissipação de calor como, por exemplo, carcaça de motor elétrico, disco de freio, etc. Tratamentos térmicos são aplicados neste material por produzir efeitos visíveis nas suas características microestruturais e, com isso, proporcionar melhorias em suas propriedades mecânicas, contudo, poucos estudos são realizados avaliando os efeitos de tais tratamentos nas propriedades térmicas. O presente trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos da aplicação do tratamento de recozimento, normalização e têmpera com revenido na condutividade térmica de duas classes de ferro fundido cinzento, o FC 200 e o FC 300. Para avaliar esses efeitos, foi utilizado o método fluxímetrico para quantificar a condutividade térmica. A matriz da testemunha e amostras tratadas pós tratamentos foram avaliadas de forma qualitativa, comparando com a literatura. A morfologia foi avaliada utilizando o método de estereologia quantitativa por meio do Software Goitacá. Foram verificados 4 parâmetros para a grafita sendo eles a distribuição, fração volumétrica, área total e área média. Os tipos de grafita apresentados foram comparados com a ISO 945 (2015). No total, 32 testes foram realizados a fim de garantir a repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados. Para o FC 200, a amostra recozida e normalizada apresentaram um aumento na condutividade térmica de 23,7% e 5,86%, respectivamente, equanto a amostra temperada apresentou uma redução de 22,3%%. Já para o FC 300, o recozimento proporcionou um aumento na mesma propriedade de 6,05% e, normalização e têmpera com o revenido, uma redução de 1,86% e 17,26%, respectivamente. Essas mudanças foram proporcionadas pela nítida alteração nas características microestruturais de ambas as classes. Na grafita, os parâmetros avaliados sofreram notáveis diferenças comparando as amostras pós tratamentos com a testemunha. A matriz também sofreu alterações, encontrando-se uma concentração maior de ferrita nas amostras recozidas e perlita nas amostras normalizadas e temperadas.

Palavras-chave: Ferro fundido cinzento. Tratamento térmico. Condutividade térmica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de grafita encontrada no ferro fundido
Figura 2 - Classifcação da distruibuição e forma dos veios de grafita do FC18
Figura 3 - Imagem esquemática dos parâmetros utilizados para caracterização da morfologia da grafita, onde P é o perímetro, X o eixo maior, Y o eixo maior, L o comprimento real e A a área.
Figura 4 - O comprimento médio dos veios de grafita, medido nas amostras de fundição e discos de freio, exibe uma relação crescente com a difusividade térmica.
Figura 5 - Efeito da temperatura sobre a quantidade de tensões internas aliviadas. 24
Figura 6 - (A - não-inoculado, B – inoculado, sem tratamento); (C – não-inoculado, D – inoculado, recozimento); (E – não-inoculado , F – inoculado, normalização); (G – não-inoculado, H – inoculado, têmpera)25
Figura 7- Microestruturas resultantes após aquecimento de 900°C. (a) Testemunha. (b) Recozimento. (c) Normalização. (d) Têmpera
Figura 8 - Modelo do corpo de prova adotado28
Figura 9 - Forno utilizado nos tratamentos térmicos
Figura 10 - Diagrama esquemático dos tratamentos de recozimento e normalização.
Figura 11 - Diagrama esquemático dos tratamentos de têmpera e revenido30
Figura 12 - Maquina politriz e lixadeira manual31
Figura 13 - Microscópio utilizado para captura das microestruturas31
Figura 14 - (I) Amostra exemplificando parâmetros volumétricos, superficiais e lineares. II) Plano seccionado com a regiões bidimensional32
Figura 15 - Esquema do circuito para medir a condutividade térmica33

Figura 16 - Microestrutura sem ataque realçando a grafita. (a) Testemunha. Recozimeno. (c) Normalização. (d) Têmpera e revenido. Ampliação de 250x	
Figura 17 - Precipitação de nódulos de grafita sobre um fundo ferrítico em detrimer da cementita.	
Figura 18 - Micrografia da testemunha para o FC 200 com ataque Nital 2%. (a) 250 (b) 450x.	
Figura 19 - Micrografia do recozimento para o FC 200 com ataque Nital 2%. 250x. (b) 450x.	
Figura 20 - Micrografia da normalização para o FC 200 com ataque Nital 2%. 250x. (b) 450x.	` '
Figura 21 - Micrografia da têmpera e revenido para o FC 200 com ataque Nital 2 (a) 250x. (b) 450x.	
Figura 22 - Microestrutura sem ataque realçando a grafita. (a) Testemunha. Recozimeno. (c) Normalização.(d) Têmpera e revenido. Ampliação de 250x	
Figura 23 - Micrografia da testemunha para o FC 300 com ataque Nital 2%. (a) 250 (b) 450x.	
Figura 24 - Micrografia do recozimento para o FC 300 com ataque Nital 2%. 250x. (b) 450x.	
Figura 25 - Micrografia da normalização para o FC 300 com ataque Nital 2%. 250x. (b) 450x.	` ′
Figura 26 - Micrografia da têmpera e revenido para o FC 300 com ataque Nital 2 (a) 250x. (b) 450x.	

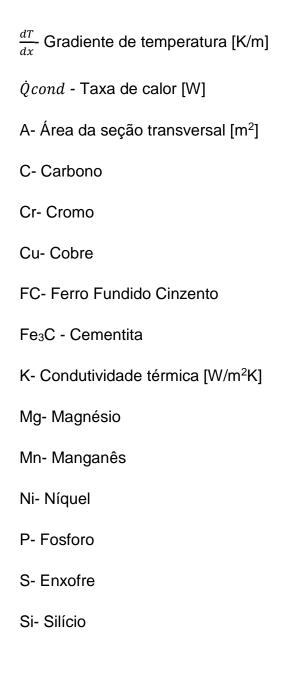
LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tamanho da grafita1
Tabela 2 - Condutividade térmica em função da temperatura para classes de ferr undido vermicular e cinzento
Tabela 3 - Condutividade térmica das principais fases metalográficas em ferr undido. 2
Tabela 4 - Composição química dos ferros fundidos estudados. 2
Fabela 5 - Quantidade de peças para a metalografia.
Fabela 6 - Quantidade de peças para o ensaio de condutividade2
Fabela 7 - Quantidade ensaios realizados3
Fabela 8 - Condutividade térmica das amostras estudadas do FC 2003
Fabela 9 - Condutividade térmica das amostras estudadas do FC 3004

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Parâmetros da grafita estudados em cad	da amostra do FC 200	37
Gráfico 2 – Parâmetros da grafita estudados em cad	da amostra do FC 300	44

LISTA DE SÍMBOLOS



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos	14
2 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 FERRO FUNDIDO	15
2.1.1 Ferro fundido cinzento	17
2.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA	19
2.2.1 Efeito da grafita na propriedade termofísica do FC	20
2.3 TRAMENTO TÉRMICO	23
2.3.1 Recozimento	23
2.3.2 Normalização	23
2.3.3 Têmpera e Revenido	24
2.3.4 Tratamento térmico dos ferros fundidos cinzentos	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 MATERIAIS	27
3.1.1 Corpos de prova	27
3.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS	28
3.3 ENSAIO METALOGRÁFICO	30
3.3.1 Estereologia quantitativa	32
3.4 MÉTODO FLUXIMÉTRICO	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1 FC 200	35
4.2 FC 300	41
5 CONCLUSÕES	48
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
ANEXO A	53
ANEXO B	54

1 INTRODUÇÃO

A capacidade de transferência de calor é muito importante em equipamentos de engenharia concebidos em ferro fundido cinzento, como, por exemplo, disco de freio, cabeçote de motor, carcaça de motor elétrico, em que o calor tem que se dissipar rapidamente e manter a temperatura baixa a fim de resguardar a vida útil do mesmo (HOLMGREN et. al., 2008). No entanto, devido à carga térmica de trabalho, alguns equipamentos são sujeitos à fadiga térmica que, consequentemente, causa uma instabilidade dimensional e aumenta as tensões internas (YANG et. al. 2015).

Induzida durante o aquecimento e resfriamento alternado do material, a fadiga térmica é um mecanismo de falha progressivo correspondente à fonte de deformação cíclica imposta como resultado da expansão térmica do material causado pela diferença de temperatura, o que ocasiona a nucleação de trincas (MALUF, 2007). De acordo com Tschiptschin et. al. (2003), a falha por fadiga térmica é minimizada pela condutividade térmica do material que, no caso do ferro fundido cinzento, é influenciado pelo teor de grafita presente na microestrutura. Segundo Pieske (1980, apud SILVA, 2015) o coeficiente de condutividade térmica é influenciado também por outras condições da microestrutura como a ferrita, perlita e cementita.

Segundo Chiaverini (1986), a velocidade de resfriamento e a presença de determinados elementos de liga influenciam na quantidade, morfologia e a distribuição da grafita, assim como na alteração dos outros microconstituintes. Dentre os elementos que exercem maior efeito estão o carbono e o silício: o carbono determina a quantidade de grafita que se pode formar e o silício atua como elemento grafitizante promovendo a decomposição da Cementita (Fe₃C). Devida a elevada velocidade de resfriamento, haverá formação de veios finos de grafita e menor distribuição. À medida que se reduz a velocidade de resfriamento, resultará em veios grosseiros de grafita aliado à maior distribuição.

Busca-se por diferentes alternativas para aperfeiçoar a propriedade termofísica do ferro fundido cinzento aplicado a elevadas temperaturas. Dentre estas está a capacidade do material em absorver e, em seguida, dissipar o calor a maior taxa possível, a fim de minimizar a fadiga térmica e aumentar a vida útil do mesmo.

Durante o ciclo de frenagem, por exemplo, o material pode atingir um gradiente térmico superior a 500°C, entre o núcleo e a superfície (CUEVA, 2007), caracterizando uma transferência de calor por condução influenciada fortemente pela condutividade térmica do material. Para o ferro fundido cinzento com a mesma composição química, o tamanho da grafita pode resultar em um aumento de até 50% na difusividade térmica (HECHT et. al., 1999).

Há evidências de que os tratamentos térmicos (Recozimento, Normalização e Têmpera) produzem efeitos visíveis nas características microestruturais do ferro cinzento, associados à diferente distribuição e morfologia da grafita (SEIDU e KUTELU, 2013). Apesar de conhecidos os efeitos dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas, pouco estudo é encontrado na literatura com relação aos efeitos nas propriedades térmicas do ferro cinzento. Dentro deste contexto, o presente trabalho propõe analisar a influência do tratamento térmico na condutividade térmica de duas classes de Ferro Fundido Cinzento, o FC 200 e o FC 300, ambas aplicadas no setor automotivo e sujeitas a elevadas temperaturas (CUEVA, 2007).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Verificar a influência do tratamento térmico quanto a sua contribuição na condutividade térmica do ferro fundido cinzento FC.

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Tratar as amostras de FC aplicando os tratamentos térmicos de recozimento, normalização e têmpera com revenido;
- ✓ Medir a condutividade térmica das amostras recozidas, normalizadas e temperadas pelo método fluximétrico e comparar com a amostra não tratada;
- ✓ Comparar a mudança das microestruturas resultantes dos tratamentos térmicos;
- ✓ Avaliar a influência dos tratamentos na condutividade térmica do material.

2 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

2.1 FERRO FUNDIDO

Os ferros fundidos constituem um grupo de ligas ferrosas caracterizado por possuir o teor de carbono acima de 2%. Possui grande importância para o setor industrial por oferecer um gama de vantagens que, mediante tratamento térmico e adição de elementos de liga, o tornaram viável em aplicações que antes eram exclusivas dos aços (CHIAVERINI, 1996).

Podem se distinguir os seguintes tipos de ferro fundido (CALLISTER, 2012):

- Ferro Fundido Cinzento;
- Ferro Fundido Nodular;
- Ferro Fundido Branco;
- Ferro Fundido Maleável;
- Ferro Fundido Vermicular.

A diferença entre esses tipos de ferros fundidos está principalmente na morfologia da grafita, na qual é classificada em seis tipos, conforme a ISO 945 (2015). Os ferros fundidos podem apresentar mais de um tipo de grafita em sua microestrutura (MARTINS, 2012). O tipo I representa o ferro fundido cinzento, contudo, há casos em que ele é representado pelo tipo II. A grafita tipo III representa o ferro fundido vermicular devido a sua forma similar a um verme, que dá nome ao material. O tipo IV e V, os ferros brancos e maleáveis, respectivamente. O tipo VII, por sua forma ser mais esférica, como nódulos, representa o ferro nodular (Figura 1).

Figura 1 - Tipos de grafita encontrada no ferro fundido.

Fonte: Adaptado ISO 945, 2015.

Além da forma, a grafita também é classificada pela dimensão de 1 a 8 (Tabela 1), sendo o nº 1 a maior dimensão e o nº 8 a menor (ASTM A 247:2006).

Tabela 1 - Tamanho da grafita.

Tamanho da classe	Dimensão atual (<i>u</i> m)
1	≥1280
2	640 a <1280
3	320 a < 640
4	160 a < 320
5	80 a < 160
6	40 a < 80
7	20 a < 40
8	<20

Fonte: Adaptado ASTM A 247, 2006.

O tipo e o tamanho da grafita são influenciados pela concentração de Carbono (C), Silício (Si) e outros elementos de liga, como, por exemplo, Manganês (Mn), Fósforo (F) e Enxofre (S), bem como a taxa de solidificação e os tratamentos térmicos (MARTINS, 2012). Para o ferro branco, a maioria do carbono existe como Cementita (Fe₃C), em vez de grafita, devido a elevada taxa de resfriamento, resultando em uma fratura de tom claro (CALLISTER, 2012).

Das classes de ferro fundido, o cinzento apresenta melhor resposta a tratamentos térmicos, semelhantes aos aços (CHIAVERINI, 1996). Diante disso, é frequente a pesquisa de tratamentos térmicos neste material.

2.1.1 Ferro fundido cinzento

Dentre os ferros fundidos, o cinzento é o mais comum e antigo. Possui ampla utilidade pelo fato de, mediante aplicação de elementos de liga e tratamento térmico adequado, oferecer uma gama de propriedades mecânicas desejáveis, além de apresentar um custo de 20 a 40% menor que os aços. Apresenta teores de carbono e silício entre 2,5 a 4,0%, e 1,0 a 3,0%, respectivamente. Em razão do carbono na forma de veios de grafita (Figura 1 - tipo I) sob uma matriz que pode ser ferrítica, perlítica ou ferrítica-perlítica, sua fratura apresenta um tom acinzentado dando origem ao nome (CHIAVERINI, 1996; YANG et. al. 2015).

Dentre os tipos de grafita apresentado anteriormente, o ferro cinzento é constituido principalmente do tipo I, podendo apresentar o tipo II nas ligas hipereutética. Sua grafita pode ser classificada pela forma e distribuição de A a E, conforme mostrado na figura 2 (ISO 945, 2015).

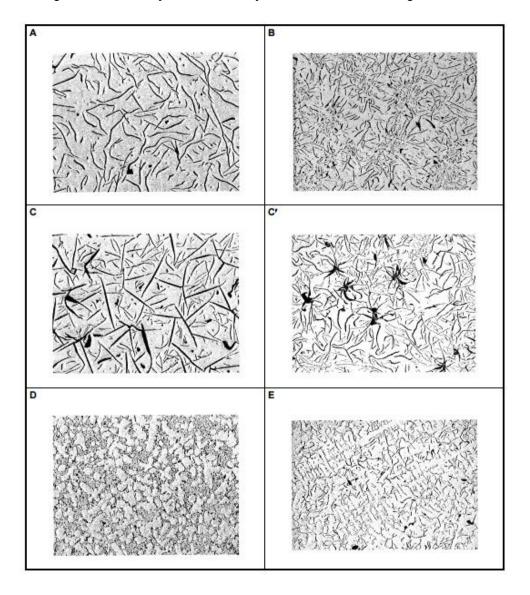


Figura 2 - Classifcação da distruibuição e forma dos veios de grafita do FC.

Fonte: Adaptado ISO 945, 2015.

A grafita é o fator microestrutural determinante no comportamento mecânico deste material, interrompendo a uniformidade ou continuidade da matriz. Sua morfologia pode atuar como concentrador de tensões que facilita a precipitação e propagação de trincas contribuindo para o desgaste do material. Entretanto, apesar de apresentar esta desvantagem, oferece ao material capacidade de amortecer vibrações, boa resistência ao desgaste, excelente usinabilidade, auto-lubrificação e boa condutividade térmica (MALUF, 2007; CHIAVERINI, 1996).

2.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A Transferência de Calor é a ciência que estuda a taxa do fluxo de energia na forma de calor provocado pela diferença de temperatura entre dois sistemas, podendo ocorrer de três modos: condução, convecção e radiação (ÇENGEL, 2012). No entanto, como o material de estudo do presente trabalho trata-se de um sólido, foi abordado apenas o modo por condução.

A transferência de calor por condução, em sólido ou fluido estacionário, deve-se as interações (colisões e difusões moleculares) entre partículas mais energéticas, associadas à alta temperatura, e menos energéticas, associadas à baixa temperatura (INCROPERA et. al, 2015). A taxa de condução de calor deve ocorrer na direção do decréscimo de temperatura que, através da Lei de Fourier, pode ser determinada pela equação:

$$\dot{Q}_{cond} = -k.A.\frac{dT}{dx} \tag{1}$$

Onde k é a condutividade térmica do material em W/m.K, sendo a medida da capacidade do material em conduzir calor (ÇENGEL, 2012). A representa a área da seção transversal da amostra, \dot{Q}_{cond} o fluxo de calor em W e $\frac{dT}{dx}$, o gradiande de temperatura dado em K/m. Em sólidos, a condução ocorre através da combinação das vibrações na estrutura cristalina e o movimento de translação dos elétrons livres (AQUINO, 2014).

Alguns materiais podem apresentar uma variação significativa na condutividade térmica ao longo de certos intervalos de temperatura. Comparando a condutividade térmica de duas classes de ferro fundido vermicular e duas classes de cinzento em função da temperatura, Guesser et. al. (2005) constataram que o ferro cinzento apresentou uma redução em seus valores, enquanto que o ferro vermicular não obteve uma variação significativa (Tabela 2). Uma possível razão está no teor de carbono, que é maior nas classes de ferro vermicular do que nas classes de ferro cinzento. No entanto, é possível verificar que, mesmo com a redução da condutividade térmica no ferro cinzento, este apresentou valores superiores comparado ao ferro vermicular.

Tabela 2 - Condutividade térmica (W/m.K) em função da temperatura para classes de ferro fundido vermicular e cinzento.

Temperatura (° C)	CGI 350	CGI 450	Ferro cinzento 250	Ferro cinzento 300
100	37,0	33,6	50,0	45,5
200	37,4	34,2	46,6	43,15
300	37,2	34,3	43,6	41,2
400	36,5	33,9	40,9	39,7

Fonte: Adaptado de GUESSER et. al., 2005.

2.2.1 Efeito da grafita na propriedade termofísica do FC

Comparado aos microconstituintes do ferro fundido cinzento, a grafita é a fase que apresenta maior condutividade térmica, conforme a Tabela 3 (GUESSER et.al., 2005). Sua morfologia e tamanho são fatores que exercem grande influência na capacidade de dissipação de calor, pois quanto maior for a razão entre a área superficial da grafita e seu respectivo volume, maior será a capacidade do material em transferir calor (MALUF, 2007). A grafita em forma esférica apresenta menor condutividade do que a grafita compactada, que por sua vez tem uma condutividade menor do que o ferro cinzento com sua grafita em veios (HECHT et. al., 1999).

Tabela 3 - Condutividade térmica (W/m.K) das principais fases metalográficas do ferro fundido em função da temperatura.

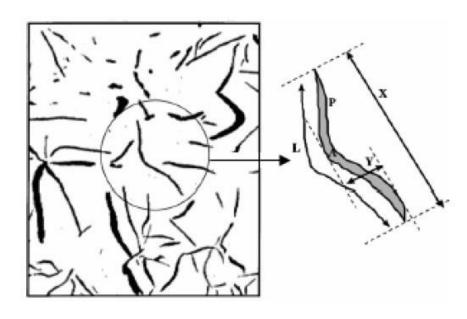
Constituinte metalográfico	0 – 100 °C	500 °C	1000 °C
Ferrita	71-80	42	29
Perlita	50	44	40
Cementita	7-8	-	-
Grafita	-	-	-
-Paralela ao plano basal	293-419	84-126	42-63
-Perpendicular ao plano basal	84	-	-

Fonte: Adaptado de GUESSER et.al., 2005.

Verifica-se pela Tabela 3 que a condutividade térmica na direção paralela ao plano basal da grafita é elevada. Sendo assim, pode ser alcançada uma máxima condutividade térmica em uma forma de grafita que facilite a propagação do calor ao longo do seu plano basal (GUESSER et.al., 2005; HECHT et. al., 1999).

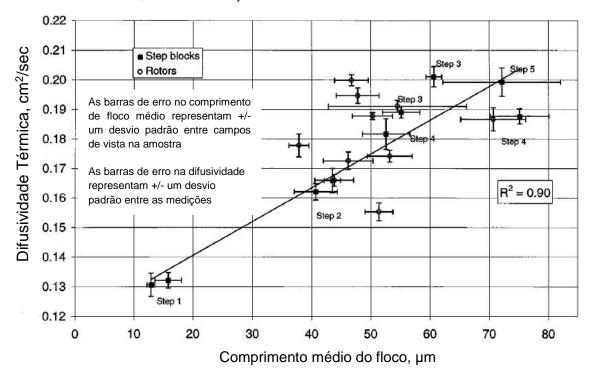
Em 1999, Hecht et. al. analisaram a difusividade térmica – que possui relação linear com a condutividade térmica do material – em função da morfologia do veio de grafita, composição química e taxa de solidificação, no ferro fundido cinzento SAE G3000 empregados em discos de freio automotivo. Foi utilizado um programa comercial de análise de imagem para medir as dimensões do veio da grafita (Figura 3). Um grupo de amostras, de mesma composição química, foi obtido através de moldes de fundição concebidos para terem 5 taxas de solidificação diferentes. Verificou-se que menores taxas de solidificação resultam em um aumento no comprimento médio da grafita, afetando de maneira crescente na difusividade térmica do ferro cinzento, como mostra a Figura 4.

Figura 3 - Imagem esquemática dos parâmetros utilizados para caracterização da morfologia da grafita, onde P é o perímetro, X o eixo maior, Y o eixo maior, L o comprimento real e A a área.



Fonte: Adaptado de HECHT et. al., 1999.

Figura 4 - O comprimento médio dos veios de grafita, medido nas amostras de fundição e discos de freio, exibe uma relação crescente com a difusividade térmica.



Fonte: Adaptado de HECHT et. al., 1999.

2.3 TRAMENTO TÉRMICO

Tratamento térmico é um conjunto de operações extremamente comum no meio industrial. Os metais e ligas são submetidos a aquecimento até o ponto de recristalização sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar a microestrutura e conferir-lhes determinadas características (CALLISTER, 2012).

Em geral, a alteração das propriedades mecânicas, mediante determinado tratamento térmico, é obtida com a perda de outras — o aumento na ductilidade provoca a queda da dureza, por exemplo — de modo que a otimização envolve sempre um compromisso de propriedades. Dentre os principais objetivos do tratamento térmico encontra-se a melhoria na resistência ao calor (CHIAVERINI, 1986).

2.3.1 Recozimento

Este tratamento tem como objetivo garantir ao material uma estrutura mais homogênea e, desta forma, conferir a peça melhor usinabilidade e eliminar defeitos internos mediante alteração da sua microestrutura. Consiste no aquecimento a uma temperatura suficientemente elevada acima da zona crítica, mantido por um tempo suficiente para homogeneizar toda a peça, seguido de um resfriamento lento, geralmente ao forno (MARTINELLI, 2010).

2.3.2 Normalização

A normalização é um processo semelhante ao de recozimento, contudo, neste tratamento a peça é resfriada ao ar, garantindo uma diminuição do tamanho do grão, resultando em uma maior dureza do material. Isso acontece devido a velocidade de resfriamento ser maior (SILVA, 2011).

2.3.3 Têmpera e Revenido

Aplicado quando se deseja obter um material com alta dureza e resistência. Este tratamento consiste em aquecer o material e submetê-lo a um resfriamento brusco, feito em água. Com essa queda de temperatura cria-se uma matriz martensítica conferindo ao material alta dureza, no entanto, esse procedimento deixa o material suscetível a trinca devido a altas tensões internas, sendo necessário aplicar um revenido para alivia-las. O revenido, ou alivio de tensões, é um procedimento em que há um novo aquecimento a uma temperatura inferior a de mudança de fase seguido de um resfriamento lento (SILVA, 2011). Segundo Chiaverini (1996), recomenda-se uma temperatura entre 560 °C e 600 °C para se obter 80% de tensões internas aliviadas (Figura 5).

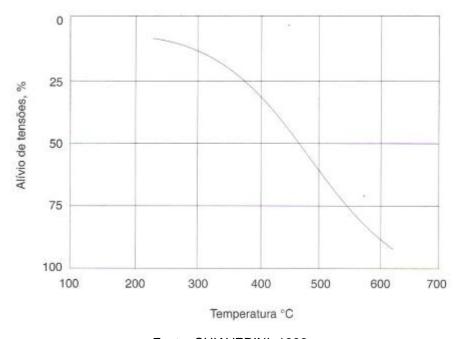


Figura 5 - Efeito da temperatura sobre a quantidade de tensões internas aliviadas.

Fonte: CHIAVERINI, 1996.

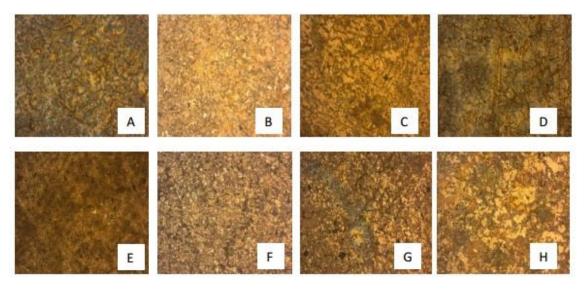
2.3.4 Tratamento térmico dos ferros fundidos cinzentos

O comportamento do ferro fundido cinzento quando submetido a tratamento térmico é semelhante aos aços, podendo obter uma alteração em sua microestrutura com o objetivo de aperfeiçoar suas propriedades (CHIAVERINI, 1986).

Seidu e Kutelu (2013) analisaram a dureza em amostras de ferro fundido cinzento com inoculação (0,2% ferrosilício) e sem inoculação. As amostras foram submetidas a processos de tratamento térmico: recozimento, normalização e têmpera. Verificouse um efeito visível na microestrutura das amostras após os tratamentos térmicos (Figura 6), e a dureza do material decresceu em ordem dos processos térmicos de normalização, recozimento e têmpera, na qual as amostras não-inoculadas apresentaram valores superior às amostras inoculadas.

Os autores ainda destacam a presença da grafita do tipo A, B e D resultante dos tratamentos térmicos de recozimento, normalização e têmpera, respectivamente. Tais tipos de grafita com distribuição distinta foram observadas em ambas as amostras inoculadas e não-inoculadas, havendo uma maior distribuição nas amostras inoculadas.

Figura 6 - (A - não-inoculado, B - inoculado, sem tratamento); (C - não-inoculado, D - inoculado, recozimento); (E - não-inoculado, F - inoculado, normalização); (G - não-inoculado, H - inoculado, têmpera).

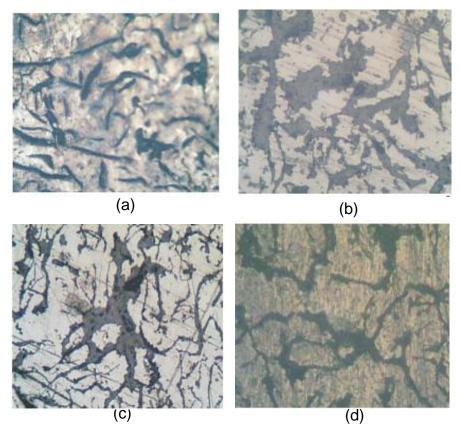


Fonte: SEIDU E KUTELU, 2013.

ATANDA et. al (2010) estudaram a influência do percentual de cromo e do tratamento térmico na dureza do ferro fundido cinzento. Avaliaram amostras com porcentagem de cromo de 0,5%, 1,5%, 2,5% e uma amostra sem adição deste elemento de liga. Além disso, as amostras foram recozidas, normalizadas e temperadas nas temperaturas de 800 °C, 850 °C e 900 °C. Observaram que há um aumento da dureza com a adição de cromo devido a formação de carbonetos de

cromo. Perceberam também que, as microestruturas do ferro fundido são afetadas significativamente (Figura 7).

Figura 7- Microestruturas resultantes após aquecimento de 900°C. (a) Testemunha. (b) Recozimento. (c) Normalização. (d) Têmpera.



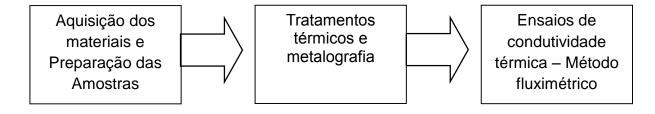
Fonte: ATANDA et.al (2013)

De acordo com Aluko e Alabi (2013), que investigaram o efeito do tratamento nas propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento e a taxa de corrosão destes, o recozimento alivia as tensões internas resultantes do processo de fundição e minimiza a corrosão do material em comparação a normalização e têmpera. Contudo, as amostras recozidas apresentaram dureza inferior em relação aos outros tratamentos. Essas mudanças ocorreram devido a alteração na microestrutura do material.

Malik et. al (2015) avaliaram o efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas do ferro cinzento. Foram aplicados tratamentos térmicos de tempera em três classes de materiais a uma temperatura de 920 °C. Observaram que em todas as classes a microestrutura sofreu considerável mudança, isso resultou num aumento da dureza.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para cumprir os objetivos do trabalho, a metodologia foi dividida em três etapas. A primeira sendo caracterizada na aquisição dos materiais e preparação das amostras. A segunda na aplicação dos tratramentos térmicos e ensaio metalográfico e, por ultima e terceira etapa, a aplicação dos ensaios de condutividade pelo método fluxímetrico. As etapas foram esquematizadas no fluxograma abaixo:



3.1 MATERIAIS

Foram utilizadas duas classes de ferros fundidos cinzento, o FC 200 e o FC 300, classificação conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O material foi adquirido na forma de tubo maciço. A composição química está representada na Tabela 4, especificada conforme fabricante (ANEXO A e B).

Tabela 4 - Composição química dos ferros fundidos estudados.

Material		%C	%Si	%P	%Mn	%S	%Cr	%Cu
FC 200		3,29	2,2	0,12	0,16	0,025	-	-
FC 300	Mín	3,08	2,61	0,07	0,42	0,117	0,05	0,16
	Máx	3,48	2,7	0,083	0,48	0,13	0,05	0,17

Fonte: AUTORES, 2017.

3.1.1 Corpos de prova

Os ferros fundidos cinzentos adquiridos foram cortados e usinados a fim de obter 8 amostras com 25,4 mm de diâmetro e 12 mm de comprimento, sendo 4 amostras para cada classe. Foram cortados também 8 corpos de prova com 25,4 mm de diâmetro e 50 de comprimento, sendo 4 para cada classe (Figura 8). Os corpos de

prova com 12 mm de comprimento foram utilizados para os ensaios metalográficos e os de 50 mm os ensaios de condutividade.

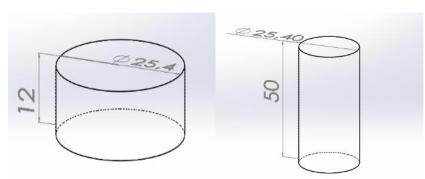


Figura 8 - Modelo do corpo de prova adotado.

Fonte: AUTORES, 2017.

As tabelas 5 e 6 representam a quantidade de peças para cada teste.

Tabela 5 - Quantidade de peças para a metalografia.

Material	Testemunha	Recozimento	Normalização	Têmpera e revenido
FC 200	1	1	1	1
FC 300	1	1	1	1
	T	OTAL DE AMOSTF	RAS: 8	

Fonte: AUTORES, 2017.

Tabela 6 - Quantidade de peças para o ensaio de condutividade.

Material	Testemunha	Recozimento	Normalização	Têmpera e revenido
FC 200	1	1	1	1
FC 300	1	1	1	1
	TO	OTAL DE AMOSTF	RAS: 8	

Fonte: AUTORES, 2017.

3.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

As amostras cortadas foram sumetidas a tratamentos térmicos realizados num forno de mufla com capacidade de até 999 °C (Figura 9), localizado no laboratório de metalografia das FAACZ- Faculdades Integradas de Aracruz.



Figura 9 - Forno utilizado nos tratamentos térmicos.

Fonte: AUTORES, 2017.

As amostras da classe 200 e 300 sofreram aquecimento na temperatura de 900°C permanecendo no interior do forno por 2 horas. Após esse período, estas foram resfriadas, sendo recozidas, normalizadas e temperadas (Figura 10 e 11).

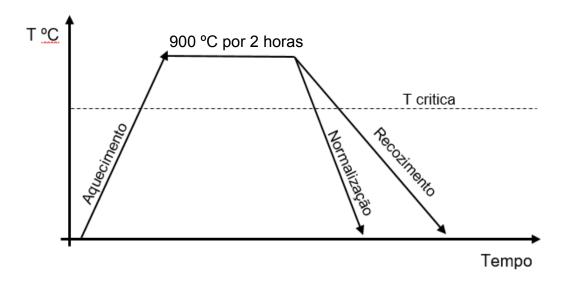


Figura 10 - Diagrama esquemático dos tratamentos de recozimento e normalização.

Fonte: AUTORES, 2017.

Para aliviar as tensões internas, o corpo de prova temperado foi aquecido novamente a 600 °C por 1h e resfriado ao forno a fim de aliviar as tensões internas provenientes do resfriamento brusco.

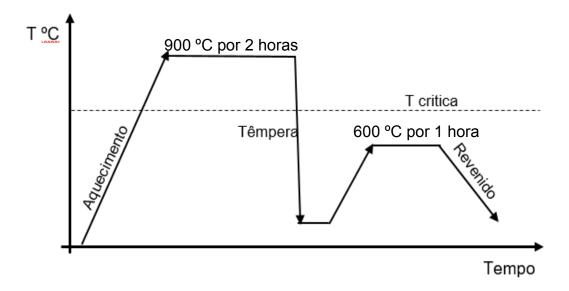


Figura 11 - Diagrama esquemático dos tratamentos de têmpera e revenido.

Fonte: AUTORES, 2017.

No total, foram tratadas 6 amostras com 12 mm de comprimento para o ensaio metalográfico, sendo as outras duas utilizadas para comparação das microestruturas. Também foram tratadas 6 amostras com 50 mm para o ensaio de condutividade. As outras 2 amostras foram utilizadas para comparar os resultados.

3.3 ENSAIO METALOGRÁFICO

A amostra de referência e as tratadas termicamente foram submetidas a uma sequência de lixamentos em lixadeira manual com lixas d'água de granulometria de 80, 100, 120, 180, 320, 400 e 600, respectivamente. A seguir, os espécimes passaram por um polimento utilizando uma máquina politriz, juntamente com água e um aglumerante a base de alumina para um acabamento mais fino. Após o polimento, as amostras foram lavadas com álcool e água. Posteriormente, secadas para eliminar a umidade residual. Ambos os equipamentos estão localizados no laboratório de metalografia da FAACZ (Figura 12).



Figura 12 - Maquina politriz e lixadeira manual.

Fonte: AUTORES, 2017.

As imagens das microestruturas foram capturadas utilizando o microscópio localizado no laboratório de metalografia da FAACZ (Figura 13).



Figura 13 - Microscópio utilizado para captura das microestruturas.

Fonte: AUTORES, 2017.

Após realizada as etapas do ensaio metalográfico, foi analisada a distribuição da grafita bem como, sua fração volumétrica, a área superficial total e a área média unitária do veio de grafita. Os parâmetros foram quantificados através do *Software* Goitacá que, por meio da Estereologia Quantitativa, avalia as características microestruturais das amostras.

Para avaliar os parâmetros geométricos da grafita, foram capturadas cinco imagens de pontos distintos da microestrutura, de cada amostra termicamente tratada e, de cada testemunha. Todas as imagens foram submetidas as mesmas dimensões de

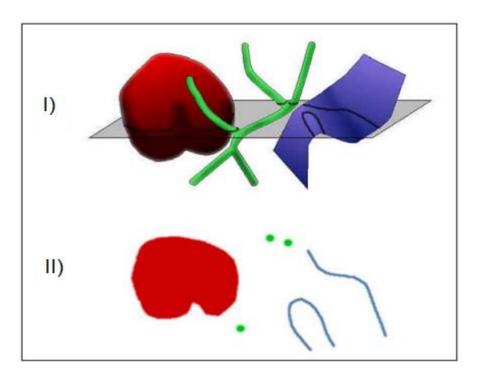
corte (502x602 pixels) e seguiram os mesmos procedimentos de análise dentro do software, a fim de evitar incoerências nos resultados.

Os tipos de grafita encontradas nas microestruturas foram comparadas com a ISO 945 (2015), enquanto os micrconsituintes provenitentes da matriz foram analisados de forma qualitativa.

3.3.1 Estereologia quantitativa

Fundamentada na geometria e na probabilidade, a Estereologia Quantitativa consiste de uma ferramenta capaz de determinar os aspectos tridimensionais baseado em aspectos bidimensionais. Uma vez que uma microestrutura é seccionada, seus elementos volumosos, superficiais e lineares, surgem como áreas, linhas e pontos, respectivamente, conforme mostra a Figura 14. Inserindo uma malha sobre o plano de corte que, por sua vez, obedece um critério de pesos, é possível obter os parâmetros geométricos de uma fase, ou várias, presente na microestrutra (SALES, 2014).

Figura 14 - (I) Amostra exemplificando parâmetros volumétricos, superficiais e lineares. II) Plano seccionado com a regiões bidimensional.



Fonte: Adaptado de SALES, 2014.

3.4 MÉTODO FLUXIMÉTRICO

Neste método, o corpo de prova é colocado entre uma fonte quente e uma fria com um fluxo de calor unidimensional. Este fluxo de calor é medido pelo fluxímetro que dá o nome ao método. Foi escolhido este procedimento pois permite atingir o regime permanente mais rápido se comparado ao método da placa quente protegida e permite medir alta condutividade térmica (SIMIONI, 2005). Além disso, este método é regulamentado pela Norma 02:135.07-001/05 da ABNT.

O circuito termal (Figura 15), utilizado para medir a condutividade térmica, consta com a presença de um elemento de aquecimento (Fonte quente) por meio de resistência elétrica alimentado por uma fonte de energia, o fluxímetro que recebe o fluxo de calor, o corpo de prova e a fonte fria, dispositivo responsável para dissipar o calor. No fluxímetro e no corpo de prova foram fixados 3 termopares, espaçados igualmente para controle de temperatura. O circuito termal foi posicionado no interior de uma estrutura de madeira contendo isolamento. A madeira e o isolamento térmico servem para minimizar as fugas de calor radiais.

Figura 15 - Esquema do circuito para medir a condutividade térmica.

Fluxo de calor

Fonte de calor

Fluxímetro

Fonte de prova

Fonte fria

Fonte: AUTORES, 2017.

Ao atingir o regime permanente e com perdas mínimas de calor, a condutividade térmica pode ser calculada pela lei de Fourier.

$$\dot{Q}_{cond} = -k. A. \frac{dT}{dx}$$
 (1)

$$k = -\frac{\dot{Q}_{cond}}{A.\frac{dT}{dx}}$$
 (2)

A condutividade foi verificada para todos os corpos de prova, os que sofreram tratamentos térmicos e os que não sofreram. Foram realizados 4 testes para cada amostra a fim de garantir a reprodutibilidade e a repetibilidade, assim como, permitir o cálculo de desvio padrão. No total, 32 testes foram feitos (Tabela 7).

Tabela 7 - Quantidade de ensaios realizados.

Material	Amostra	Recozimento	Normalização	Têmpera e revenido
FC 200	4	4	4	4
FC 300	4	4	4	4

TOTAL DE ENSAIOS: 32

Fonte: AUTORES, 2017.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 FC 200

Após a realização dos testes foi possível quantificar as condutividades térmicas para a testemunha e cada amostra tratada. A testemunha apresentou uma condutividade média de 28,74 ± 1,07 W/m.K a 24,5 °C, enquanto que as amostras tratadas apresentaram 35,55 ± 2,37 W/m.K a 19°C, 30,42 ± 1,67 W/m.K a 21,5°C e 22,33 ± 2,79 W/m.K a 20,75°C para o recozimento, normalização e têmpera seguido de revenido, respectivamente (Tabela 8). Observa-se que os ensaios apresentaram uma repetibilidade satisfatória, conforme verificado pelo baixo desvio padrão encontrado. Embora houve uma mudança nas temperaturas médias, estas apresentaram uma variação pequena, o que permite desconsiderar uma alteração significativa na condutividade térmica.

Tabela 8 - Condutividade térmica, em W/m.K, das amostras estudadas do FC 200.

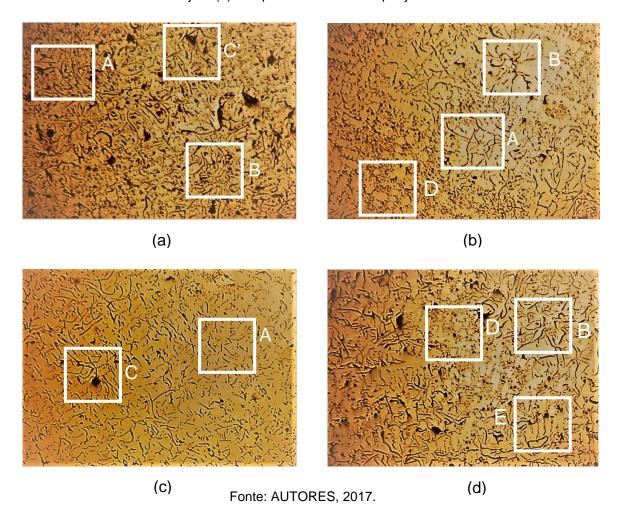
	Testemunha	Recozimento	Normalização	Têmpera e
				revenido
Ensaio 1	28,20	39,55	32,51	20,93
	(a 26°C)	(a 20°C)	(a 22°C)	(a 21°C)
Ensaio 2	28,51	35,03	29,19	19,39
	(a 27°C)	(a 18°C)	(a 24°C)	(a 20°C)
Ensaio 3	27,71	33,87	28,43	22,15
	(a 20°C)	(a 19°C)	(a 20°C)	(a 20 °C)
Ensaio 4	30,52	33,74	31,55	26,85
	(a 25°C)	(a 19°C)	(a 20°C)	(a 22°C)
Média	$28,74 \pm 1,07$	$35,55 \pm 2,37$	$30,42 \pm 1,67$	$22,33 \pm 2,79$
	(24,5°C)	(19 °C)	(21,5°C)	(20,75°C)

Fonte: AUTORES, 2017.

Para as amostras recozidas e normalizadas, houve um aumento de 23,7% e 5,86%, respectivamente, enquanto a amostra temperada apresentou uma redução de 22,3%, conforme os valores apresentados na Tabela 8.

Nota-se que as diferentes velocidades de resfriamento resultaram em uma nítida mudança nos tipos de grafita, que foi analisado de acordo com a norma ISO 945. Destaca-se a grafita do tipo A, B e C' para a testemunha (Figura 16a), grafitas tipo A, B e D para a amostra recozida (Figura 16b). A amostra normalizada apresentou grafitas do Tipo A e C (figura 16c). Na amostra temperada, se destacou as do tipo B, D e E com uma concentração maior do tipo E (figura 16d).

Figura 16 - Microestrutura sem ataque realçando a grafita. (a) Testemunha. (b) Recozimeno. (c) Normalização. (d) Têmpera e revenido. Ampliação de 250x.



Outros parâmetros relacionados à grafita como distribuição, área total, área média unitária do veio de grafita e a fração volumétrica também sofreram modificações com os tratamentos térmicos. O Gráfico 1 apresenta essa relação de parâmetros associados a cada amostra estudada.

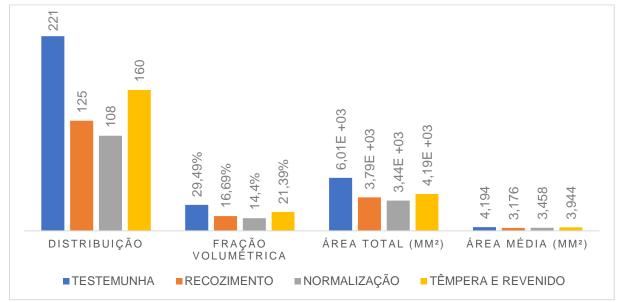


Gráfico 1 - Parâmetros da grafita estudados em cada amostra do FC 200.

Percebem-se as alterações significativas que os tratamentos térmicos tiveram nos parâmetros da grafita, evento que pode ser constatado comparando os valores encontrados com aqueles da testemunha.

Poder-se-ia esperar maiores parâmetros da grafita no recozimento do FC 200 devido à menor taxa de resfriamento proporcionar maior efeito grafitizante decompondo parcialmente a cementita (Fe₃C) da perlita que, por sua vez, resultariam em lamelas de grafita mais grosseira (CHIAVERINI, 1996). No entanto, verificou-se que a têmpera e o revenido apresentaram maiores parâmetros da grafita (Gráfico 1) decorrente do fenômeno de grafitização secundária ocorrida durante o processo de revenimento (PIMENTEL, 2011).

Derivada da alta taxa de resfriamento, e da ausência de difusão, a matriz resultante do processo de têmpera é essencialmente martensita e austenita retida (MIKELONIS, 1982, apud PIMENTEL, 2011). O posterior processo de revenido segrega os carbonetos da martensita e decompõe a austenita retida em ferrita e cementita (HENRRING, 2007 apud PIMENTEL, 2011). Os carbonetos provenientes da martensita e da cementita depositam-se sobre as lamelas pré-existente de grafita, causando o seu engrossamento, e na precipitação de novos nódulos de grafita (figura 17), dando origem ao mecanismo de grafitização secundária (PIMENTEL, 2011).



Figura 17 - Precipitação de nódulos de grafita sobre um fundo ferrítico em detrimento da cementita.

Com base nos parâmetros encontrados, esperava-se uma maior condutividade térmica na testemunha, seguida pela têmpera e revenido, recozimento e normalização, pois, dentre os microconstituintes do ferro fundido cinzento, a grafita apresenta a maior condutividade térmica (GUESSER et.al, 2005) e, pelo fato do ferro cinzento tratar-se de um material anisotrópico, tais alterações sugerem uma interferência nas direções aleatórias que, por sua vez, influenciam na condutividade térmica do material (CHEN e CHEN, 2011).

No entanto, estas alterações não justificam os valores encontrados, ou seja, ao se analisar a condutividade térmica, a grafita não é um fator isolado. Os microconstituintes da matriz também influenciam (PIESKE, 1980 apud SILVA, 2015) e, com os tratamentos térmicos, houve uma notável mudança em todas as amostras (Figura 18 a 21).

Figura 18 - Micrografia da testemunha para o FC 200 com ataque Nital 2%. (a) 250x. (b) 450x.

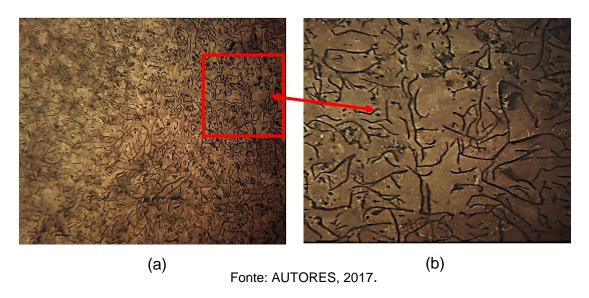
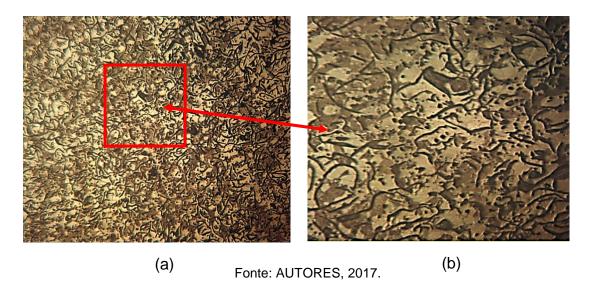


Figura 19 - Micrografia do recozimento para o FC 200 com ataque Nital 2%. (a) 250x. (b) 450x.





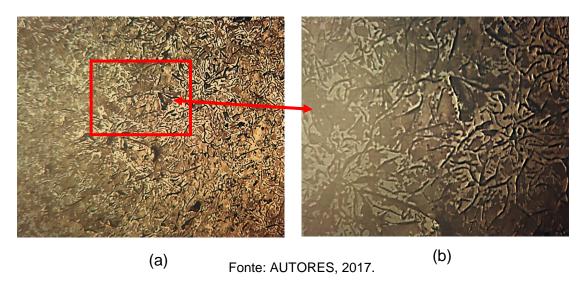
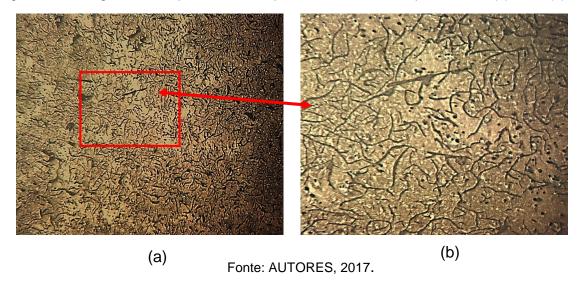


Figura 21 - Micrografia da têmpera e revenido para o FC 200 com ataque Nital 2%. (a) 250x. (b) 450x.



A testemunha apresentou uma matriz essencialmente perlítica (região marrom), estando de acordo com o certificado do material emitido pelo fabricante (ANEXO A). Com a aplicação do tratamento térmico de recozimento, a matriz passou a ser essencialmente ferrítica (região clara) com pequenas concentrações de perlita (figura 19). Essa formação foi proporcionada pelo resfriamento lento que permitiu que a perlita fosse decomposta em ferrita (CHIAVERINI, 1986).

A amostra normalizada apresentou maior concentração de perlita comparada a ferrita, o que justifica sua matriz ferritica-perlitica (figura 20). A presença da fase ferrítica, sugere que o tempo de resfriamento permitiu a dissolução parcial da perlita em ferrita.

A matriz da amostra submetida à têmpera e revenido apresentou as fases ferrítica e perlítica, sendo esta última em maior concentração (figura 21). Ambas as fases são provenientes da dissolução da martensita e austenita retida durante o processo de revenimento (HERRING, 2007 apud PIMENTEL, 2011). A presença da fase perlítica sugere que o tempo de revenido adotado no presente trabalho não foi suficiente para a sua dissolução.

De acordo com Guesser et. al (2005) a ferrita é o segundo microconstuinte que apresenta a maior condutividade térmica, com 71-80 W/m.K para 100°C, e, logo após, a perlita, cujo valor é 50 W/m.K para 100°C. Diante disso, a condutividade da amostra recozida apresentou um aumento devido a uma maior fração de ferrita presente na matriz, enquanto que a amostra temperada reduziu, fato ligado a uma maior concentração de perlita.

O aumento na condutividade térmica da amostra normalizada deriva da fase ferrítica observada em sua microestrutura bem como, a presença de grafita tipo A que, dentre os tipos de grafita, apresenta a maior condutividade térmica por apresentar maior tamanho e melhor forma (PIRES, 2006).

Nota-se que a constituição da matriz afetou de maneira mais significativa o transporte térmico. Fato este que pode ser analisado através da comparação entre os parâmetros grafíticos da testemunha com as amostras termicamente tratadas que, mesmo ocorrendo uma redução (Gráfico 1), apresentaram um aumento ou diminuição na condutividade térmica.

4.2 FC 300

Para o FC 300, a testemunha apresentou uma condutividade térmica de 29,23 ± 1,60 W/m.K a 23°C, enquanto que as amostras recozidas, normalizadas e temperadas apresentaram uma condutividade de 31 ± 0,47 W/m.K a 19,5°C, 28,69 ± 1,09 W/m.K a 25°C e 24,18 ± 1,14 W/m.K a 22 °C, respectivamente (Tabela 9). Assim como no FC 200, os ensaios do FC 300 também apresentaram uma repetibilidade satisfatória ligado à um baixo desvio padrão. As temperaturas médias, embora diferentes, não apresentaram uma mudança significativa no valor da condutividade térmica.

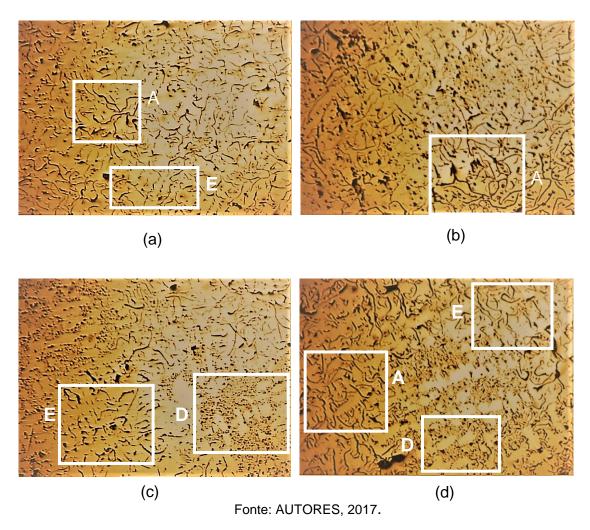
Tabela 9 - Condutividade térmica, em W/ m.K, das amostras estudadas do FC 300.

	Testemunha	Recozimento	Normalização	Têmpera e revenido
Ensaio 1	27,72	30,73	28,09	25,73
	(a 24°C)	(a 18°C)	(a 22°C)	(a 22°C)
Ensaio 2	30,73	31,74 (a	30,46	24,71
	(a 23°C)	24°C)	(a 22°C)	(a 23°C)
Ensaio 3	27,56	31,04	28,64	22,72
	(a 24°C)	(a 18°C)	(a 23°C)	(a 23°C)
Ensaio 4	30,92	30,49	27,56	23,58
	(a 22°C)	(a 18°C)	(a 23°C)	(a 21°C)
Média	$29,23 \pm 1,60$	31 ± 0.47	$28,69 \pm 1,09$	24,18 ± 1,14
	(23°C)	(19,5)	(25°C)	(a 22°C)

Conforme a Tabela 9, a amostra recozida apresentou um aumento de 6,05%, já as amostras normalizadas e temperadas reduziram sua condutividade em 1,86% e 17,26%, respectivamente.

Os tipos de grafita foram determinados conforme os procedimentos da ISO 945. Nota-se na testemunha grafitas tipo A e E (Figura 22a) e, para as amostras com tratamento de recozimento, foram encontradas as grafitas do tipo A (figura 22b). A amostra normalizada apresentou grafitas tipo D, E e algumas regiões com grafita do tipo B (figura 22c), enquanto que na amostra temperada, destacaram-se as do tipo A, D e E (figura 22d).

Figura 22 - Microestrutura sem ataque realçando a grafita. (a) Testemunha. (b) Recozimeno. (c) Normalização.(d) Têmpera e revenido. Ampliação de 250x.



Observa-se que os parâmetros geométricos associados à grafita também obtiveram mudanças (Gráfico 2).

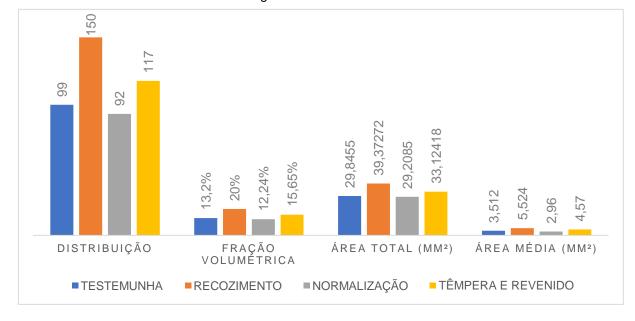


Gráfico 2 - Parâmetros da grafita estudados em cada amostra do FC 300.

Os parâmetros como distribuição, fração volumétrica, área total e área média apresentaram uma notável alteração. O recozimento do FC 300 foi o que apresentou os maiores resultados. Esse fato pode estar ligado a uma maior porcentagem de silício presente na composição química do FC 300, no qual atua como elemento grafitizante decompondo a cementita em ferrita mais grafita (COLPAERT, 2008), além da menor taxa de resfrimamento favorecer esse processo.

Percebe-se que a têmpera com revenido resultou em parâmetros maiores do que a testemunha e a normalização. Esse efeito sugere que o processo de grafitização secundária também ocorreu, porém, não de forma acentuada como no FC 200. Isso, por que, a presença de Cr age como estabilizador da cementita minimizando sua dissolução (PIMENTEL, 2011).

A grafita é o microconstituinte que possui a maior condutividade térmica dentre todos os outros (GUESSER et. al, 2005), além de possuir uma natureza anisotrópica superior e, por isso, causa um grande efeito na condutividade (CHEN e CHEN, 2011). Diante disso, era esperado uma maior propriedade associada ao recozimento, seguido de têmpera com revenido, testemunha e normalização, entretanto, os microconstituintes da matriz influenciam e, pós tratamentos, as estruturas apresentaram mudanças significativas.

A testemunha do FC 300 também apresentou uma matriz essencialmente perlitica (região marrom), estando de acordo com o material fornecido pelo fabricante (ANEXO B). Com a aplicação do recozimento, a amostra passou a apresentar uma região maior de ferrita e aspectos de perlita (Figura 24). Essa alteração foi proporcionada pelo resfriamento lento que, permite a decomposição da perlita em ferrita (CHIAVERINI, 1986).

Na amostra normalizada, resultou-se em uma matriz ferrítica-perlítica, sendo esta última em maior concentração (figura 25). Mudança proporcionada pela velocidade de resfriamento. Entretanto, pela velocidade de resfriamento ser superior à do tratamento de recozimento, a formação de ferrita foi limitada.

Observa-se que a matriz resultante da amostra temperada predomina maior concentração da fase perlítica com algumas regiões de ferrita (Figura 26), indicando a diminuição do fenômeno de grafitização secundária sobre a amostra.

(a) (b)

Figura 23 - Micrografia da testemunha para o FC 300 com ataque Nital 2%. (a) 250x. (b) 450x.

Fonte: AUTORES, 2017.

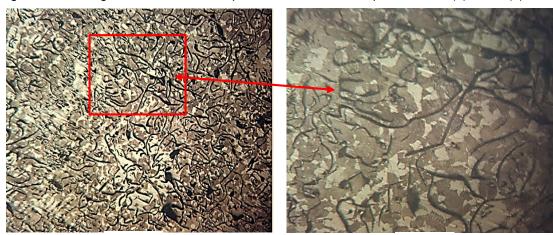


Figura 24 - Micrografia do recozimento para o FC 300 com ataque Nital 2%. (a) 250x. (b) 450x.

Figura 25 - Micrografia da normalização para o FC 300 com ataque Nital 2%. (a) 250x. (b) 450x.

(b)

(a)

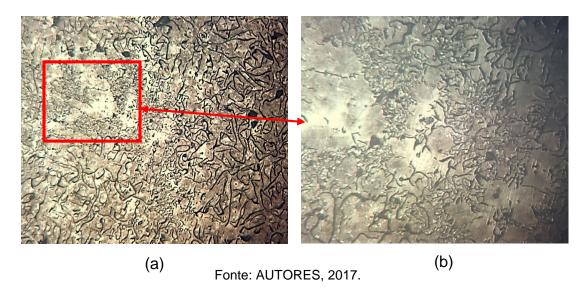
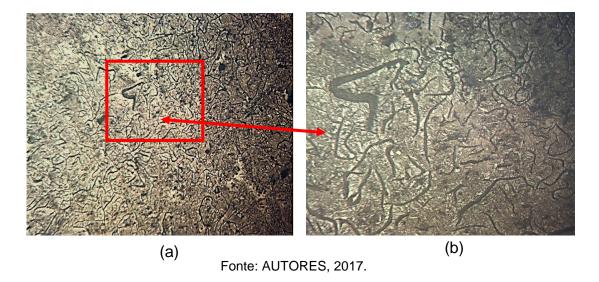


Figura 26 - Micrografia da têmpera e revenido para o FC 300 com ataque Nital 2%. (a) 250x. (b) 450x.



O tratamento de recozimento aumentou a condutividade térmica, pois apresentou uma maior concentração de ferrita, no entanto, esse aumento não foi tão significativo quanto ao do FC 200. Isso está ligado ao fato de que no FC 300, a concentração de ferrita foi inferior ao verificado na outra classe. Essa redução pode ter sido afetada pela maior porcentagem de Manganês (Mn) e Cromo (Cr), pois são conhecidos como elementos perlitizantes e são adicionados a fim de obter uma maior dureza no material (COLPAERT,2008) e, com isso, limitou a formação de ferrita.

Já nas amostras normalizadas e temperadas, a propriedade foi reduzida, pelo fato de ter apresentado maior concentração de perlita. Isso por que de acordo com Guesser, et. al (2005), a perlita possui uma condutivade térmica inferior a grafita e a ferrita.

Comparado a testemunha, observa-se que mesmo com o aumento nos parâmetros grafíticos ocorrido durante o processo de recozimento, a condutividade térmica não apresentou um aumento tão acentuado comparada à amostra recozida do FC 200, onde obteve um acréscimo de 23,7% mesmo com uma redução nos parâmetros, contra 6,05% do FC 300. Sugerindo que, os microconstituintes da matriz exerceram maior influência sobre a condutividade térmica.

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos e das análises e discussões apresentadas, percebeuse uma mudança significativa nas microestruturas que sofreram tratamento térmico em relação as testemunhas, tanto nos parâmetros relacioanados a grafita quanto na matriz do material.

A velocidade de resfriamento proveniente dos tratamentos e a presença de alguns elementos químicos foi o que possibilitou essas variações. Para o FC 200, esperavase uma distribuição, assim como os outros parâmetros grafíticos, mais acentuada no recozimento, devido a uma velocidade de resfriamento mais lenta. No entanto, a amostra temperada e revenida foi a que apresentou os maiores parâmetros, devido ao processo de grafitização secundária que ocorreu logo após o revenimento. Esse fenômeno também ocorreu no FC 300, porém, menos acentuado, pois a presença de Cr estabiliza a cementita minimizando sua dissolução.

Os tratamentos também modificaram a microestrutura da matriz em que se destaca uma concentração maior de ferrita na amostra recozida e, mais perlita na normalização e têmpera em ambas

Essas alterações provocaram nítidas mudanças na condutividade térmica de ambas as classes. Para o FC 200, as amostras recozidas e normalizadas apresentaram um aumento de 23,7% e 5,86%, repesctivamente, enquanto a amostra temperada apresentou uma redução de 22,3%. Já para o FC 300, o recozimento proporcionou um aumento de 6,05%, normalização e têmpera, uma redução de 1,86% e 17,26%, respectivamente.

A grafita apresenta a maior condutividade térmica dentre os microconstituintes e, com isso, esperava-se uma maior influencia na propriedade do material, no entanto, a presença de ferrita e perlita foram os microconstituintes que tiveram maior influência nessas mudanças.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do estudo realizado, foram levantadas pesquisas a serem realizadas como segue abaixo:

- Avaliar a condutividade térmica para diferentes temperaturas de austenitização com diferentes tempos de aquecimento;
- Verificar o efeito da grafitização secundária, para diferentes tempos e temperaturas de revenido sobre a condutivade térmica;
- Estudar o efeito dos tratamentos térmicos avaliados no presente trabalho na difusividade térmica e no calor especifíco;
- Verificar o efeito do tratamento térmico em outra classe de ferro fundido.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALUKO, F. I; ALABI, A. G. F. The Effect of heat treatment on the mechanical properties of gray cast iron in paper making industries. **International Journal of Engineering Research & Technology**. v. 2. Nigeria, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT. Projeto de Norma 02:135. 07-005: Desempenho Térmico de Edificações: Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método Fluximétrico. Rio de Janeiro, 2003.

ASTM – American Society for Testing Materials. ASTM A 247 – 16a- Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings, 2006.

ATANDA, P; OKEOWO, A; OLUWOLE, O. Microstructural study of heat treated chromium alloyed grey cast iron. **Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering**. v. 9, n. 3, p. 263-274. Nigéria, 2010.

CALLISTER JUNIOR, W. D. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução. 7ª ed. Rio deJaneiro, LTC, 2012.

ÇENGEL, Y. A; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa**. 4 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2012.

CHEN, J. K; CHEN, S. F. On thermal conductivity of an in-situ metal matrix composite - cast iron. **Metal, Ceramic and Polymeric Composites for Various Uses.** Disponivel em: https://www.intechopen.com/books/metal-ceramic-and-polymeric-composites-for-various-uses/thermal-conductivity-of-an-in-situ-metal-matrix-composite-cast-iron. Acesso em 18 de outubro de 2017.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de engenharia**. 2ª ed. São Paulo: McGraw-Hill,1986.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. 7 ed. São Paulo: ABM, 1996.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. Editora: Blucher, 4°ed., 2008.

CUEVA, G.; TSCHIPTSCHIN, A. P.; SINATORA, A.; GUESSER, W. L. **Desgaste de ferros fundidos usados em discos de freio de veículos automotores**. São Paulo: Escola Politécnica - Universidade de São Paulo. 2007. 6p. Disponível em: < http://www.tupy.com.br/downloads/guesser/desgaste_ferros_fundidos_freio.pdf>. Acesso em 18 janeiro de 2017.

GUESSER, W. L; MASIERO, I; MELLERAS, E; CABEZAS, C. S. Thermal Conductivity of Gray Iron and Compacted Graphite Iron Used for Cylinder Heads. **Revista Matéria**. n. 2, v. 10, p. 265-272, 2005. Disponível em: http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10660/>. Acesso em 17 de fevereiro de 2017.

- HECHT, R. L; DINWIDDIE, R. B, WANG, H. The effect of graphite flake morphology on the thermal diffusivity of gray cast irons used for automotive brake discs. **JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE**. n. 34, p. 4775-4781, 1999.
- HERRING, D. What do We Really Know about Tempering? Industrial Heating, p. 16-18, julho/2007.
- HOLMGREN, D; DIÓSZEGI, A. SVENSSON, I. L. Effects of Carbon Content and Solidification Rate on the Thermal Conductivity of Grey Cast Iron. **Tsinghua Science and Technology.** v. 13, n. 2, p. 170-176, 2008.
- INCROPERA, F. P; DEWITT, D. P. **Fundamentos da transferência de calor de calor e massa**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- ISO 945-1: Microstructure of cast irons Part 1: Graphite classification by visual analysis, 2008.
- MALIK, J; EPERJESI, S; VASKOVÁ, I; FECKO, D. Increasing of utility properties of grey cast iron castings with heat treatment. **Archives of Foundry Engineering**. v. 15, n, p. 13-16. Slovakia, 2015.
- MALUF, O. Fadiga termomecânica em ligas de ferro fundido cinzento para discos de freio automotivos. 2007, 230 f. Tese doutorado Programa de Pós-Graduação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- MARTINELLI, I. M. Influência do recozimento na recuperação e recristalização de tirar de aço de baixo carbono dobradas por deformação a frio. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- MARTINS, R. R. R. Comparação das propriedades mecânicas e de fadiga entre ferro fundido vermicular e cinzento utilizados em blocos de motor diesel. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- MIKELONIS, P.; CORP, G. C. **Heat Treating Gray and Ductile Iron**. Modern Casting, setembro/1982.
- PIESKE, A; CHAVES, L. M; REIMER, J. F. Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade. 3th edição. Joinville, SOCIESC, 1980.
- PIMENTEL, A. S. O. **Grafitização secundária em ferro fundido cinzento.** 2011. 143 f. Dissertação (Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais). Programa de Pós- Graduação, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2011.
- PIRES, A. C. Desenvolvimento de ligas de ferro fundido cinzento para a fabricação de cilindros secadores utilizados em máquinas de produção de

- **papel.** 2006.121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciencia dos Materiais). Universidade São Francisco, Itatiba, 2006.
- SALES, D. S. Desenvolvimento de um software livre para análise de imagens com estereologia quantitativa. 183f. Tese Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, 2014. Disponível em:http://uenf.br/posgraduacao/engenhariademateriais/wpcontent/uploads/sites/2/2013/07/Sales-2014-v397.pdf. Acesso em 20 de setembro de 2017.
- SEIDU, S. O; KUTELU, B. J. Influence of Heat Treatment on the Microstructure and Hardness Property of Inoculated Grey Cast Iron. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 3, n. 9, p 888-892, 2013.
- SILVA, M. J. Análise híbrida numérico-experimental da troca de calor por convecção forçada em aletas planas. 2015. Joinville, 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina.
- SILVA, R. F. T. Análise e avaliação da influência de diferentes ciclos de tratamento térmico nas propriedades mecânicas do aço microfundido ultrarresistente ic-4340. 81 f. Monografia Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- SIMIONI, W. I. Análise de erros na medição de condutividade térmica de materiais através do método fluximétrico. 2005. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- TSCHIPTSCHIN, A. P.; CUEVA, G.; GUESSER, W. L.; BAUMER, I.; SINATORA, A. Ferros fundidos empregados para discos e tambores de freio. São Paulo. Escola Politécnica Universidade de São Paulo, 2003. 6p. Disponível em:http://www.tupy.com.br/downloads/guesser/ferro_fund_freio.pdf>. Acesso em 12 de fevereiro de 2017.
- YANG, X.; ZHANG, Z.; WANG, J.; REN, L. Investigation of nanomechanical properties andthermal fatigue resistance of gray cast iron processed by laser alloying. **Jornal of Alloys and Compounds**, China, v. 626, p. 260-263. 2015.

ANEXO A – LAUDO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FC 200

CERTIFICADO DE QUALIDADE / QUALITY CERTIFICATE N° 003395	ultra inox		Kua Humberto de Campos , 17 - 5 anom Telefax : (027) 3200 – 8040 / 3328 – 1884 E-mail : ultrainox@terra.com.br	Telefax: (027)3200 – 8040 / 3328 – 1884 E-mail: ultrainox@terra.com.br	328 – 1884 om.br	
CHA COUTINHO-ARACRUZ - ES	CERTIFI	CADO DE QUALI	DADE / QUALITY CER	1	003395	
HEMICAL COMPOSITION (%) HEMICAL COMPOSITION (%) / MECHANICAL PROPERTIES / Alongamento Enlongation of Área Enlongation (%)	1/ Date: 15/05/17 nte / Client: LUCIANO SARTORI ereço / Adress: RUA MANOEL ROCH ificado da Usina / Steel Mill's Certificate	IA COUTINHO-ARACRUZ - 1	SS			
TICAL COMPOSITION (%) MECHANICAL PROPERTIES Alongamento Enlongation Enlongat	sa Nota Fiscal / Bill Number: 046868N Pedido / Order: 000000	ossa Ordem de Serviço / Product	ion Order: 000000			
COMPOSIÇÃO QUÍMICA / CHEMICAL COMPOSITION (%) PERRO FUNDIDO FC200 025MM 3,29 2,20 0,120 0,16 0,16 0,16 0,16 0,16 0,16 0,16 0,1	ceificações do Material / Material Specifi dição de Fornecimento / Delivery Condit ma Aplicada / Material Type : FC200	ication: FERRO FUNDIDO FO	.200 025MM (27,56MM)			
Dimensions C Si P Mn S PRRO FUNDIDO FC200 025MM 3.29 2.20 0.150 0.16 0.025 PROPERTIES	S	OMPOSIÇÃO QUÍ	MICA / CHEMICAL CO	OMPOSITION (%)	
FERRO FUNDIDO FC200 025MM 3.29 2.20 0,120 0,16 0,025	Dimensões Dimensions	Si P Mn				
Minimo Máximo Máximo PROPRIEDADES MECÂNICAS / MECHANICAL PROPERTIES ite de Resistência Limite de Escoamento Fencile Strength (MPA)	FERRO FUNDIDO FC200 025MM (27,56MM)	2,20 0,120 0,16				
PROPRIEDADES MECÂNICAS / MECHANICAL PROPERTIES Limite de Escoamento Limite de Escoamento Reduction of Área (MPA) (MPA)						
Limite de Escoamento Estricção Alongamento Reduction of Área Enlongation (MPA) (MPA)	PR	OPRIEDADES MI	CÂNICAS / MECHAN	IICAL PROPERT		
		imite de Escoamento Yeald Strength	Estricção Reduction of Área (MPA)	Alongamento Enlongation (%)	Ha Ha	Jureza
	(

ANEXO B – LAUDO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FC 300

