

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

MARIA CÉLIA ZULIANI

**INFLUÊNCIA DO DESGASTE E DO CALOR DE FRENAGEM NA
MICROESTRUTURA DE DISCOS DE FREIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2016

MARIA CÉLIA ZULIANI

**INFLUÊNCIA DO DESGASTE E DO CALOR DE FRENAGEM NA
MICROESTRUTURA DE DISCOS DE FREIO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

LONDRINA

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DO DESGASTE E DO CALOR DE FRENAGEM NA MICROESTRUTURA DE DISCOS DE FREIO

por

MARIA CÉLIA ZULIANI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 25 de Maio de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
Prof. Orientador

Prof. André Luis da Silva
Membro titular

Prof. Roger Nabeyama Michels
Membro titular

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. De Materiais

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e forças para superar as dificuldades e alcançar meus objetivos.

Aos meus pais Pedro e Célia e aos meus irmãos Marcelo e Pedro, por sempre me apoiarem e incentivarem ao longo desses anos de curso, demonstrando o verdadeiro sentido de família e de amor incondicional.

Ao meu orientador Prof. Dr. Odney Carlos Brondino, por acreditar em mim e por contribuir com sua experiência e conhecimento para realização deste trabalho, guiando-me sempre com sabedoria e sendo exemplo de pessoa e profissional.

As minhas amigas Laiza, Livea e Nicole, que sempre estiveram ao meu lado, me ajudaram e proporcionaram momentos especiais em minha vida.

A todos os professores da universidade que contribuíram para minha formação acadêmica, e ao técnico de laboratório Filippe Bernardino, pela sua disponibilidade e colaboração na realização dos procedimentos do trabalho.

Enfim a todos meus amigos e familiares que de certa forma colaboraram para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

ZULIANI, Maria Célia. **Influência do Desgaste e do Calor de Frenagem na Microestrutura de Discos de Freio**. 2016. 97 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2016.

Com o crescente aperfeiçoamento dos veículos automotivos, fez-se necessário o aprimoramento conjunto dos sistemas de freios, seguindo a evolução automotiva. De todos os sistemas existentes, o sistema de freios a disco é o mais utilizado atualmente, consistindo no travamento do disco pela compressão aplicada por pastilhas, proporcionando a frenagem. Normalmente estes discos são manufacturados em ferro fundido cinzento por apresentarem boa resistência ao desgaste, boa condutividade e difusividade térmica, baixo custo, além de outras vantagens, que fazem deste um dos materiais mais adequados na produção dos discos. Porém, as propriedades deste material e conseqüentemente a eficiência do disco, são influenciadas pela morfologia, distribuição e tamanho da fase grafita presente, a qual pode se alterar durante as etapas do processo de fabricação do disco ou durante a sua utilização nos veículos automotivos, devido à variações de calor e ao desgaste durante a frenagem, sendo motivo para o realização do trabalho, cujo objetivo é determinar qual o grau de influência do calor e do desgaste na microestrutura e propriedades do ferro fundido cinzento de discos de freio. Com isso foi realizado o presente estudo, onde através da preparação metalográfica foi possível analisar as microestruturas de amostras dos discos novo e usado, utilizando-se para isso um microscópio óptico com aumento de 100x e 1000x, identificando a fase grafita na forma de veios e a predominância de matriz perlítica. Pode-se concluir assim que, os discos não apresentaram diferença na morfologia e tipo de sua grafita, porém observou-se maior dimensionamento dos veios de grafita do disco usado do que do disco novo, indicando que o calor de frenagem ou o próprio processo de fundição podem ter influenciado na microestrutura do disco usado.

Palavras-chave: Sistema de freios. Ferro fundido cinzento. Veículos automotivos.

ABSTRACT

ZULIANI, Maria Célia. **Wear Influence and Brake Heat on Microstructure brake discs**. 2016. 97 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2016.

With the increasing improvement of automotive vehicles, it became necessary to improve all the brake systems, following the automotive evolution. Of all the existing systems, disc brake system is the most widely used, consisting of the disc locking the compression applied by tablets, providing braking. Usually these discs are manufactured in gray cast iron because they have good wear resistance, good conductivity and thermal diffusivity, low cost and other advantages, which make this one of the most suitable materials for the production of discs. However, the properties of this material and consequently the drive efficiency is influenced by the morphology, distribution and size of this graphite phase which may change during the steps of the disk fabrication process or during use in automotive vehicles due the heat variations and wear during braking, and the reason for carrying out the work, which aims to determine the degree of influence of heat and wear on the microstructure and properties of gray cast iron brake discs. Thus it was performed the current study, where through the metallographic preparation was possible to analyze the microstructures of samples of the new discs and used, using for this an optical microscope at 100x magnification and 1000X, identifying the graphite phase in the form of shafts, and the predominantly pearlitic matrix. It can be concluded therefore that the discs showed no differences in morphology and type of a graphite, but there was greater dimensioning of graphite flakes disk used than the new record, indicating that the braking heat or the process itself of casting may have influenced the used disk microstructure.

Keywords: Brake system. Gray cast iron. Motor vehicles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Freio de alavanca com sapata de madeira	16
Figura 2 - Freio de cinta	17
Figura 3 - Componentes do freio a tambor.....	18
Figura 4 - Exemplo de Caliper Brake em bicicleta.....	19
Figura 5 - Sistema de freio automotivo.....	20
Figura 6 - Sistema de freio a disco ventilado	22
Figura 7 - (a) Pinça fixa e (b) Pinça flutuante	23
Figura 8 - Pastilhas de freio.....	23
Figura 9 - Mecanismo de formação de trincas térmicas.....	25
Figura 10 - Fotomicrografia do ferro fundido cinzento.....	29
Figura 11 - Ferro fundido: (a) nodular, (b) vermicular e (c) cinzento	30
Figura 12 – Diferentes tipos de grafita presentes no ferro fundido cinzento	31
Figura 13 - Transporte de calor em fofo (a)nodular, (b)vermicular e (c)lamelar	32
Figura 14 - Gráfico da difusividade térmica vs carbono equivalente	33
Figura 15 - Discos de freio e pastilhas usados com 42.750 Km rodados.....	35
Figura 16 - Vistas (a) frontal e (b) de perfil do disco com 42.750 Km rodados.	35
Figura 17 - Disco novo dianteiro.....	36
Figura 18 - Corte ao meio do disco usado	37
Figura 19 - Disco usado cortado ao meio.....	37
Figura 20 - Corte ao meio do disco novo	37
Figura 21 - Disco novo cortado ao meio.....	38
Figura 22 - (A) e (B) Posicionamento do disco na cortadeira Fortel CFIII	38
Figura 23 - Cortadeira metalográfica Fortel CFIII	39
Figura 24 - Corte do disco usado em três partes na cortadeira Fortel CFIII com refrigeração à água	39
Figura 25 - Disco usado cortado em três partes iguais	40
Figura 26 - Disco novo cortado em três partes iguais	40
Figura 27 - Disco usado cortado em seis partes iguais.....	41
Figura 28 - Disco novo cortado em seis partes iguais.....	41
Figura 29 - Corte de uma parte de um sexto do disco usado.....	42
Figura 30 - Distribuição das partes retiradas de cada um sexto (disco usado)	42
Figura 31 - Distribuição das partes retiradas de cada um sexto (disco novo) ..	43
Figura 32 - Microscópio Estereoscópio Binocular Physis	43
Figura 33 - Lixamento manual das amostras	44
Figura 34 - Politriz Fortel modelo PLF	44
Figura 35 - Amostras polidas do disco usado.....	45
Figura 36 - Amostras polidas do disco novo.....	45
Figura 37 - Microscópio óptico Carl Zeiss (metalográfico)	46
Figura 38 - Posicionamento das amostras na cortadeira para retirada da alça com refrigeração à água	46
Figura 39 - Amostra com alça retirada	46
Figura 40 - Amostras polidas com as alças retiradas.....	47
Figura 41 - Regiões microfotografadas nas amostras.....	47

Figura 42 - Grafitas limitadas da amostra (A) 1 e (B) 2	49
Figura 43 - Grafitas limitadas da amostra (A) 3 e (B) 4	49
Figura 44 - Grafitas limitadas da amostra (A) 5 e (B) 6	49
Figura 45 - Grafitas limitadas da amostra (A) 1N e (B) 2N.....	50
Figura 46 - Grafitas limitadas da amostra (A) 3N e (B) 4N.....	50
Figura 47 - Grafitas limitadas da amostra (A) 5N e (B) 6N.....	50
Figura 48 - Microestrutura da amostra 1N, (A)canto interno, (B)centro, (C)canto externo	51
Figura 49 -Microestrutura da amostra 2N, (A)canto interno, (B)centro, (C)canto externo	52
Figura 50 - Microestrutura da amostra 3N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo.....	52
Figura 51 - Microestrutura da amostra 4N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo.....	53
Figura 52 - Microestrutura da amostra 5N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo.....	53
Figura 53 - Microestrutura da amostra 6N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo.....	54
Figura 54 - Microestrutura da amostra 1, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo	54
Figura 55 - Microestrutura da amostra 2, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo	55
Figura 56 - Microestrutura da amostra 3, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo	55
Figura 57 - Microestrutura da amostra 4, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo	56
Figura 58 - Microestrutura da amostra 5, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo	56
Figura 59 - Microestrutura da amostra 6, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo	57
Figura 60 - Microestrutura da amostra 1N (A) canto interior, (B) centro, (C) canto exterior.....	58
Figura 61 - Microestrutura da amostra 2N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo.....	58
Figura 62 - Microestrutura da amostra 3N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo.....	59
Figura 63 - Microestrutura da amostra 4N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo.....	59
Figura 64 - Microestrutura da amostra 5N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo.....	60
Figura 65 - Microestrutura da amostra 6N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo.....	60
Figura 66 - Microestrutura da amostra 1, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo	61
Figura 67 - Microestrutura da amostra 2, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo	61

Figura 68 - Microestrutura da amostra 3, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo	62
Figura 69 - Microestrutura da amostra 4, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo	62
Figura 70 - Microestrutura da amostra 5, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo	63
Figura 71 - Microestrutura da amostra 6, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo	63
Figura 72 – Microestrutura da região central da amostra (A) 1N e (B) 2N	64
Figura 73 - Microestrutura da região central da amostra (A) 3N e (B) 4N	65
Figura 74 - Microestrutura da região central da amostra (A) 5N e (B) 6N	65
Figura 75 - Microestrutura da região central da amostra (A) 1 e (B) 2	65
Figura 76 - Microestrutura da região central da amostra (A) 3 e (B) 4	66
Figura 77 - Microestrutura da região central da amostra (A) 5 e (B) 6	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de expansão térmica de alguns materiais	24
Tabela 2 - Resistência mecânica dos ferros fundidos cinzentos	26
Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos	27
Tabela 4 - Limite de Resistência à Tração de diferentes materiais	28
Tabela 5 - Condutividade térmica dos diferentes tipos de ferro fundido.....	29
Tabela 6 - Tipos de grafita com sua respectiva característica.....	31
Tabela 7 - Média dos tamanhos das grafitas selecionadas do disco usado.....	67
Tabela 8 - Média dos tamanhos das grafitas selecionadas do disco novo.....	67
Tabela 9 - Resultado dos desvios padrão dos discos	68
Tabela 10 - Média das médias dos tamanhos das grafitas de ambos os discos	68

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing Materials
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOT	Department of Transportation
HP	Horse Power
SAE	Sociedade de Engenheiros da Mobilidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Geral.....	15
1.2.2 Específico.....	15
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 HISTÓRIA DO SISTEMA DE FREIOS	16
2.2 SISTEMA DE FRENAGEM	19
2.3 SISTEMA DE FREIOS A DISCO.....	21
2.3.1 Pinça de Freio	22
2.3.2 Pastilhas de Freio.....	23
2.3.3 Disco de Freio	24
2.4 FERRO FUNDIDO CINZENTO	25
3 MATERIAIS E MÉTODO.....	35
3.1 MATERIAIS	35
3.2 MÉTODO.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5 CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS.....	70
APÊNDICE.....	74
CRONOGRAMA	74

1 INTRODUÇÃO

Em um sistema de freios a disco, a interação das pastilhas com o respectivo disco, provoca a conversão da energia cinética, causada pela movimentação do veículo, em energia térmica, sendo que a quantidade de calor gerado depende tanto do peso do automóvel quanto da velocidade deste no momento em que os freios são acionados. Quando a taxa de calor gerado pelo atrito entre o disco e as pastilhas atinge grandes valores, pode fazer com que o disco atinja, por curtos períodos, elevadas temperaturas, podendo chegar a 800°C. Com isso um gradiente térmico entre a superfície e o interior do disco é gerado, podendo exceder os 500°C (CUEVA et al, 2003). (B)

Devido as condições de trabalho a que estão sujeitos os discos, o material que os constitui deve apresentar, resistência à fadiga térmica, resistência mecânica, à corrosão e ao desgaste, além de boa condutividade térmica, para que, a quantidade de calor absorvida durante a frenagem seja posteriormente dissipada o mais rápido possível. Além disso, o material também deve apresentar boa usinabilidade, baixo coeficiente de expansão térmica¹, ser leve, barato e fácil de fundir (CUEVA et al, 2003). (A)

Pelo fato dos sistemas de frenagem de automóveis estarem submetidos tanto a solicitações mecânicas quanto térmicas, diversas propriedades devem ser consideradas, por isso não é possível selecionar um material com base em apenas uma dessas propriedades. Como as variações térmicas no sistema são grandes, os ferros fundidos apresentam boa resistência quanto a esta variação, por isso estes são geralmente utilizados para manufatura dos discos (CUEVA et al, 2003). (A)

Para que se tenha uma melhor otimização do disco de freio em sua produção e utilização, este deve apresentar alguns conceitos, tais como: baixo nível de ruído, baixo custo do ciclo de vida, baixas taxas de poluição (durante a produção, montagem, utilização, desmontagem e reprocessamento do disco), baixo consumo de energia (na produção, utilização, reutilização e reciclagem),

¹ Quociente que mede a alteração relativa de comprimento ou volume que se produz quando um corpo sólido ou fluido experimenta uma alteração da temperatura.

baixo consumo de material e garantir segurança e confiabilidade (AUTOMOBILE, 1994).

Dentre os tipos de materiais que podem ser utilizados para a produção dos discos estão, os ferros fundidos cinzentos, os materiais compósitos² de matriz de carbono, os quais apresentam excelente desempenho em elevadas temperaturas, porém o custo e o modo de fabricação não convém para automóveis comuns. Outro exemplo de material utilizado é o ferro fundido com titânio, elemento responsável por aumentar a resistência do disco, entretanto reduz o coeficiente de atrito³ do mesmo, podendo causar problemas principalmente em situações em que há pouca distância para frenagem. As ligas de alumínio contendo carboneto de silício também são outro exemplo, apresentando baixa densidade, mas com menor eficiência na dissipação do calor do que o ferro fundido cinzento (MALUF et al, 2006).

Compósito com matriz metálica é o mais indicado atualmente a substituir eventualmente o ferro fundido cinzento, pelo fato deste compósito apresentar vantagens como a redução de peso e maior capacidade de resfriamento, sendo igual o aspecto do desgaste, ou melhor, no momento da frenagem, porém devido a característica do material, há uma limitação deste com relação à temperatura, suportando valores em torno de 250 a 300°C, dependendo da liga (SERBINO, 2005).

1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho justifica-se por determinar a influência da variação da energia térmica e do desgaste na estrutura do material constituinte do disco de freio ventilado dianteiro. Em caso de ocorrer mudança da estrutura, será possível estudar a influência nas propriedades do material e conseqüentemente na eficiência do disco, logo é um trabalho que visa contribuir no aperfeiçoamento

² Material composto por duas ou mais fases, sendo essas de diferentes propriedades, e que combinadas originam um material com novas propriedades.

³ Expressa a oposição que mostram as superfícies de dois corpos em contato ao deslizar um em relação ao outro.

dos sistemas de frenagem a disco, buscando a maior segurança e eficiência deste.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Verificar se há interferência do calor de frenagem e do desgaste na microestrutura do disco de freio, utilizando amostras de um disco usado, com 42.750 km rodados, e de um disco novo, ambos do mesmo modelo de carro, preparadas metalograficamente e analisadas em microscópio óptico.

1.2.2 Específico

O trabalho tem como intuito:

- Utilizar amostras obtidas de diferentes regiões dos discos de freio, devidamente preparadas para a análise microscópica;
- Estudar a morfologia das fases nas diferentes regiões do disco de freio de ferro fundido cinzento;
- Fazer uma comparação, com relação à morfologia, entre as amostras estudadas do disco usado e do novo;
- Verificar se o calor gerado no disco, devido ao contato deste com as pastilhas, e o desgaste influenciam na mudança da morfologia e do tamanho da fase grafita presente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 HISTÓRIA DO SISTEMA DE FREIOS

Segundo as leis da física, um objeto que se encontra em movimento permanece em movimento até que sofra a ação de uma força contrária, que permita mudar seu estado. Tal princípio pode ser verificado em um veículo automotivo, que quando em movimento, a aplicação de uma força contrária se faz necessária para pará-lo. Dessa forma, essa é a função do sistema de freios do veículo, o qual vem sendo desenvolvido e aprimorado ao longo dos anos (BERNHARDT, 2011).

No início do desenvolvimento dos primeiros dispositivos de freios, estes consistiam de uma alavanca com pivotagem e um bloco de madeira na extremidade junto a roda, e quando puxada a alavanca, o bloco era pressionado contra a roda, proporcionando a redução da velocidade do veículo. Tal sistema foi utilizado em veículos com rodas de aço, tornando-se inviável com a introdução do pneu de borracha (BERNHARDT, 2011).

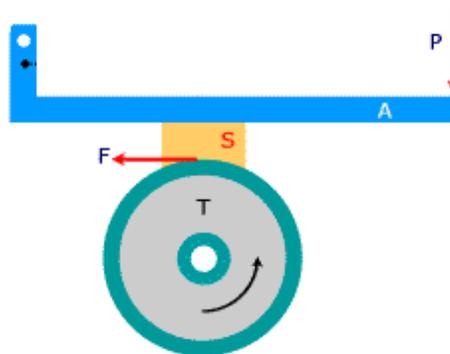


Figura 1 - Freio de alavanca com sapata de madeira
Fonte: SOARES, 2007.

Com o passar dos anos vieram os freios de cinta, constituídos de uma roda fixa no centro do eixo traseiro do veículo, envolta por uma cinta, que impedia o movimento da roda quando acionada manualmente através de uma alavanca

presa a um suporte. A princípio a cinta era constituída por couro, porém houve perda de suas características de atrito devido a degradação térmica deste material, sendo utilizada posteriormente crina, cabelo ou tecido de algodão umedecido em betumem. Por se tratar de um sistema aberto, os freios estavam submetidos a intempéries, e a contaminação desse sistema por água, barro e outros, ocasionavam problemas ao sistema e conseqüentemente perda de sua eficiência. Outro problema identificado nesse sistema, era com relação ao alto esforço mecânico do condutor sobre a alavanca, dificultando a frenagem quando em alta velocidade (DIULGHEROGLO, 2007).

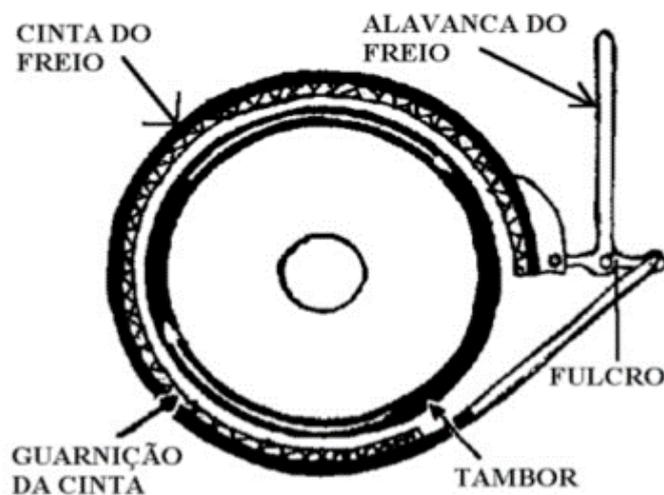


Figura 2 - Freio de cinta
Fonte: MARQUES, 2012.

Com o gradual aperfeiçoamento dos motores dos veículos automotivos, teve-se como consequência o aumento da velocidade de tais veículos. Devido a isso o sistema de freios também foi se aprimorando, seguindo a evolução dos veículos. Em 1902 o francês Louis Renault desenvolveu o conceito de freios a tambor, que consistiam de um sistema fechado, mais limpo e com maior influência da temperatura, com acionamento mecânico das sapatas, através de alavancas ou cabos (varões). Em 1930 este tipo de freio passou a ser acionado por pressão de óleo, com auxílio de cilindros ou pistões, porém o ajuste das sapatas era frequente devido ao desgaste do material de fricção (DIULGHEROGLO, 2007).

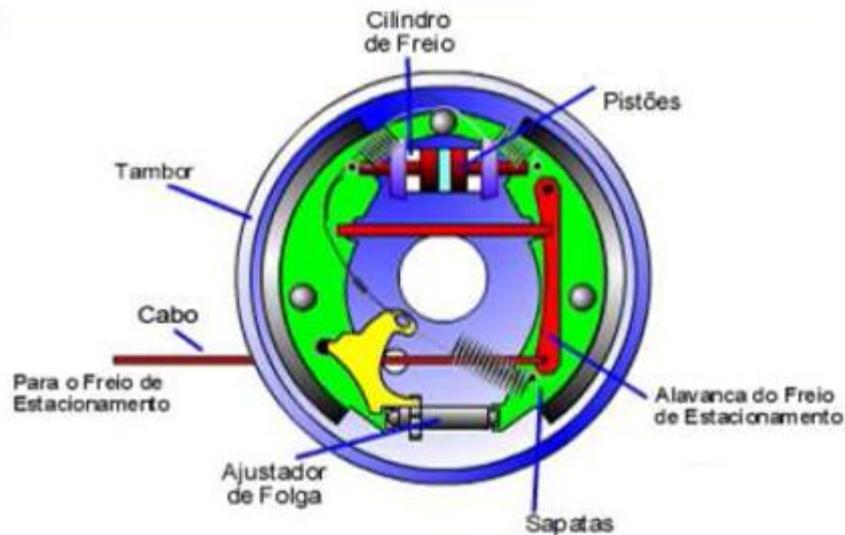


Figura 3 - Componentes do freio a tambor
 Fonte: DIULGHEROGLO, 2007.

Também em 1902, o inglês Frederick Lanchester inventou o primeiro freio a disco para veículos automotivos, cujo conceito foi inspirado nos freios originalmente idealizados para bicicletas em 1876 por Browett e Harrison, cujo sistema utilizava um mecanismo simples em balanço, que operava as sapatas de freio localizadas em cada lado do aro da roda, sendo tal sistema patenteado e chamado de *Caliper Brake*, possibilitando uma frenagem efetiva em velocidades mais elevadas e sendo utilizado pela primeira vez em 1910 no eixo traseiro do Lanchester 20 HP. Somente em 1955 é que esse tipo de sistema de freios foi inserido na produção em série de automóveis na Europa, e a partir de 1960 nos Estados Unidos (DIULGHEROGLO, 2007).

O sistema de freio a disco para bicicletas, do qual se originaram os discos de freio automotivos, pode ser analisado na Figura 4 abaixo.



Figura 4 - Exemplo de *Caliper Brake* em bicicleta
Fonte: DIULGHEROGLO, 2007.

2.2 SISTEMA DE FRENAGEM

O sistema de freio é uma combinação de peças cuja função é reduzir progressivamente a velocidade de um veículo em movimento, ou fazê-lo parar, ou conservá-lo imóvel se já estiver parado (FERREIRA, 2008) apud (BORNHOLD, 2012).

Os freios, ao atuarem, efetuam o controle do movimento da roda de um veículo através da transformação da energia cinética do veículo, ou seja, a energia do veículo devida ao movimento, em energia térmica, que é dissipada na forma de calor (DIULGHEROGLO, 2007).

O sistema de freio é constituído por diversos componentes que formam seu *layout* e esses componentes normalmente são: pedal de acionamento, cilindro mestre, mangueiras, reservatório do fluido, e um rotor que pode ser classificado quanto a sua geometria como freio a disco ou freio a tambor (CROLLA, 2009).

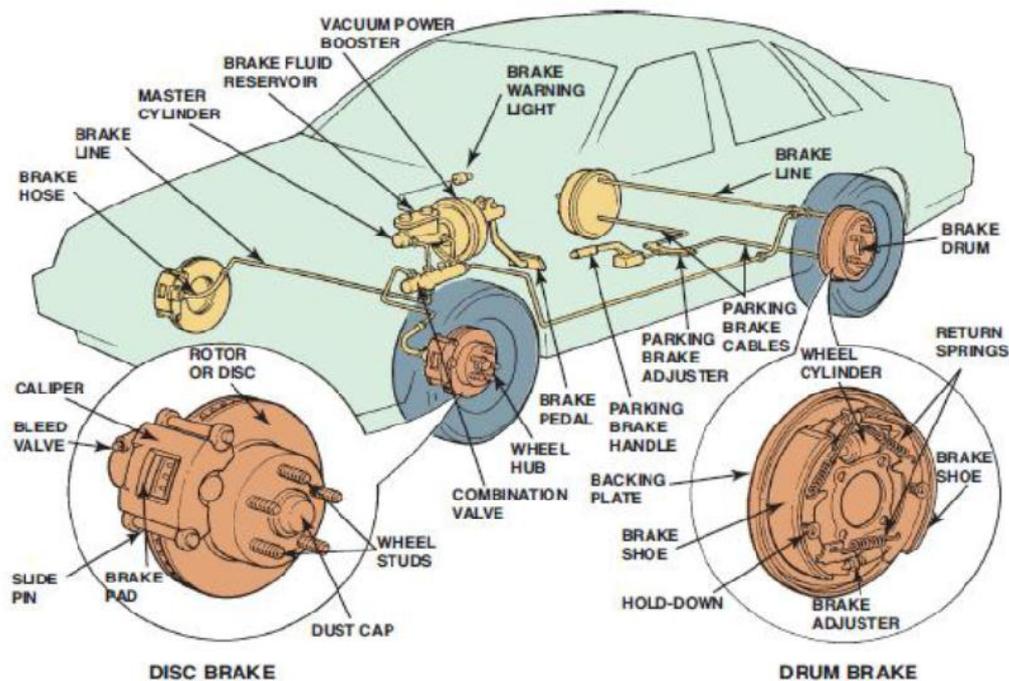


Figura 5 - Sistema de freio automotivo
 Fonte: BORNHOLD, 2012.

Segundo as normas de segurança da SAE Brasil, o veículo automotivo deve ser equipado com um sistema de freio hidráulico que atua sobre todas as rodas, sendo operado por apenas um membro inferior direito, e este sistema deve ser capaz de travar as quatro rodas quando for solicitado. O automóvel também deve apresentar pelo menos dois sistemas hidráulicos independentes, caso ocorra uma falha em qualquer ponto do sistema, pois deve se manter o freio em pelo menos duas rodas. Cada sistema deve ter seu próprio reservatório separado, ou utilizar um represado. Não são permitidas linhas de freio plásticas (SAE BRASIL, 2009) apud (BORNHOLD, 2012).

Em substituição ao sistema hidráulico utilizado atualmente, o freio elétrico automotivo vem sendo desenvolvido como promessa para um futuro próximo. Mais conhecido como *brake-by-wire*, este sistema funciona por sensores de posição (transdutores), os quais transmitem os sinais elétricos do pedal de acionamento do freio para o módulo eletrônico de controle, o qual passa o comando às válvulas sobre a pressão ideal a ser aplicada no sistema através de um controlador lógico, sendo assim, há o controle da força de frenagem aplicada individualmente em cada roda, além deste controlador poder incorporar

várias outras funções, tais como proteção à fadiga⁴ e antitravamento. Este sistema de freios inteligentes será muito mais confiável, seguro, de maior conforto e mais eficiente, com as chances de falha reduzidas assim como o seu peso (TECNOLOGIA, 2013).

2.3 SISTEMA DE FREIOS A DISCO

Este sistema é composto por disco, o qual está montado fixamente sobre o eixo que liga a roda. Para realizar o travamento do mesmo é acoplado uma pinça, a qual possui um cilindro que comprime as pastilhas de freio contra o disco realizando o seu travamento (LIMPERT, 1999) apud (BORNHOLD, 2012).

Os freios a disco podem ou não ser utilizados nas quatro rodas do automóvel, porém na maioria dos casos eles são empregados apenas nos eixos dianteiros, tendo como motivos, o preço mais elevado com relação aos freios a tambor, principalmente para veículos populares e de baixa potência de motor, e a menor participação na frenagem do eixo traseiro, sendo de 12 a 15%, valor em que o freio a tambor realiza o serviço adequadamente (DIULGHEROGLO, 2007).

Uma desvantagem significativa é com relação à possibilidade de falha no sistema hidráulico de frenagem, decorrida de uma eventual evaporação do fluido de freio. Segundo os fabricantes de fluido de freio essa evaporação só ocorre em caso crítico, quando o fluido conter uma quantidade de água entre 2 e 3%, sendo que por especificação de condições de fornecimento essa porcentagem é permitida no máximo 0,2%, conforme legislação militar norte americana FMV 571.116 (DOT3 e DOT4) (SERBINO, 2005).

O sistema de freio a disco é composto basicamente por três componentes básicos: o disco, a pinça e as pastilhas de freio (GONÇALVES, 2004).

⁴ Ciclos repetitivos de tensão ou deformação ocasionando a ruptura do material sujeito a estes ciclos.

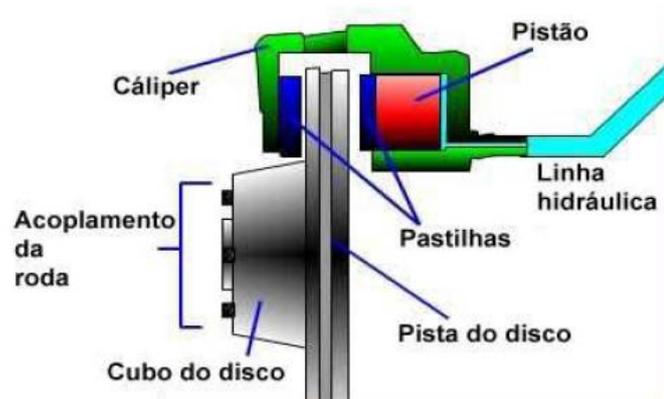


Figura 6 - Sistema de freio a disco ventilado
Fonte: SERBINO, 2005.

2.3.1 Pinça de Freio

A pinça, ou *caliper*, é um dispositivo do veículo que, está fixado em sua estrutura, e é constituído por um ou mais pistões que realizam a compressão das pastilhas no disco de freio. Quanto ao acionamento, a pinça pode ser classificada como pneumática, empregada em veículos ferroviários e alguns freios de caminhões e ônibus; hidráulica, usada na maioria dos veículos comerciais de pequeno porte; ou elétrico magnético, por esforço centrífugo (JUNIOR, 2012).

Quanto à forma que os pistões são alojados na pinça, ela pode ser classificada em flutuante ou fixa. As pinças fixas contêm um ou mais pares de pistões que atuam de forma simultânea em cada lado do disco. Desta forma, permitem que os pistões recebam a mesma pressão do sistema (GONÇALVES, 2004).

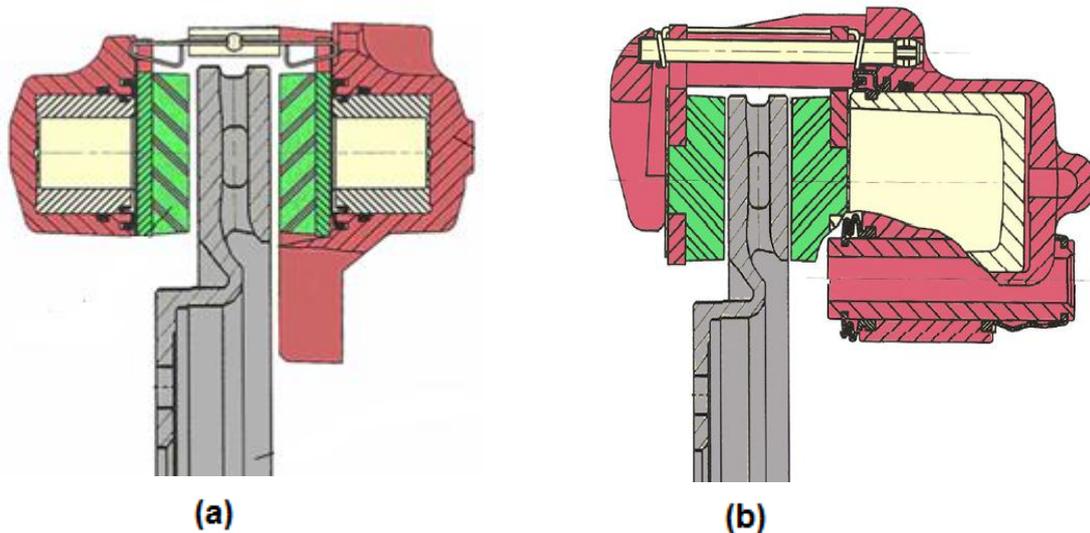


Figura 7 - (a) Pinça fixa e (b) Pinça flutuante
Fonte: Gonçalves, 2004.

2.3.2 Pastilhas de Freio

Para facilitar a manutenção, o material de atrito deve localizar-se nas pastilhas, e não nos discos. As pastilhas são compostos químicos constituídos de vários elementos, estes elementos, são formados por fibras e material de atrito na forma de pó. As empresas especializadas realizam diversos testes em laboratório, para constituir a pastilha de maior resistência, durabilidade, e de menor custo, apresentando um coeficiente de atrito entre 0,35 a 0,45 (LIMPERT, 1999) apud (BORNHOLD, 2012).



Figura 8 - Pastilhas de freio.
Fonte: BORNHOLD, 2012.

2.3.3 Disco de Freio

Normalmente o disco de freio é manufaturado em ferro fundido cinzento, pois apresenta baixo coeficiente de expansão térmica em relação aos demais materiais, como mostra a Tabela 1, além de apresentar alto coeficiente de atrito cinético, entre 0,8 e 1,0, para superfície não lubrificada. Ele apresenta basicamente duas formas construtivas: sólido e ventilado. O disco sólido, normalmente é utilizado em menores potências. Para o disco ventilado, a otimização dos canais de ventilação confere a cada disco uma forma diferenciada. Variações de formato nos canais de ventilação permitem a otimização do fluxo de ar e, por conseguinte, a refrigeração do disco, além destes canais realizarem a remoção de impurezas provenientes do material das pastilhas, isto aumenta o rendimento de frenagem e evita a redução de atrito por aquecimento (GONÇALVES, 2004).

Tabela 1 - Coeficiente de expansão térmica de alguns materiais

Material	Coeficiente de expansão térmica ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
Ferro fundido cinzento	12
Liga de cobre – latão	18
Liga de alumínio -6061T6	24
Liga de magnésio - Am 1004-T61	26

Fonte: HIBBELER, 2004.

Os freios a disco são construtivamente sistemas mais simples que os freios a tambor, com menor quantidade de componentes para sua montagem, além de apresentarem melhor performance na frenagem e melhor dissipação do calor, por se tratar de sistemas abertos (BORNHOLD, 2012).

Por ser talvez, a peça mais importante do sistema de freio a disco, o disco de freio é submetido a três tipos de fadiga, a térmica, quando o componente está sujeito apenas a variações bruscas de temperatura, a

isotérmica, quando a temperatura é estável porém a carga é variável, e a termomecânica, quando ambas, temperatura e carga, são variáveis (MALUF et al, 2006).

Um dano que pode ocorrer no disco durante a frenagem é a formação de trincas geradas pela fadiga térmica. Durante a frenagem o atrito do disco com as pastilhas de freio gera calor, causando a expansão na superfície do disco, sendo que seu núcleo permanece sob temperatura inferior, restringindo assim a deformação desta região e permanecendo dentro de seu limite plástico. Após a superfície sofrer tensões compressivas, inicia-se a contração térmica, resultando em tensões que podem trincar o material, sendo que este fenômeno pode se repetir várias vezes durante a utilização do veículo, ocasionando a propagação das trincas. A redução do gradiente térmico entre a superfície e o núcleo do disco é a maneira mais eficaz de se evitar este tipo de problema (SERBINO, 2005).

A Figura 9 a seguir, mostra o mecanismo de formação das trincas térmicas durante a frenagem.

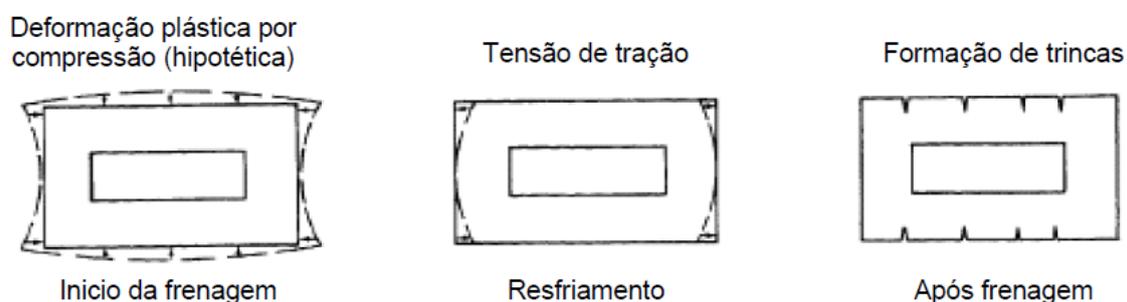


Figura 9 - Mecanismo de formação de trincas térmicas
Fonte: SERBINO, 2005.

2.4 FERRO FUNDIDO CINZENTO

Os teores de carbono e de silício nos ferros fundidos cinzentos variam entre 2,5 - 4,0%p, e 1,0 - 3,0%p, respectivamente. Para a maioria desses ferros fundidos, a grafita existe na forma de lamelas, os quais se encontram normalmente envolvidos por uma matriz de ferrita ou de perlita. Em razão dessas

lamelas de grafita, uma superfície fraturada assume uma aparência acinzentada, daí o seu nome (CALLISTER, 2008).

Segundo normas da ABNT EB-126 e DIN 1691, os ferros fundidos cinzentos são designados por FC ou GG (DIN), seguidos dos algarismos representativos do limite mínimo de resistência à tração⁵ em kgf/mm² (FC10 a FC 40), conforme a Tabela 2 abaixo. A classificação dos ferros fundidos cinzentos também é feita segundo a ASTM A48 de acordo com a resistência mecânica, sendo que os números de 20 a 60 correspondem aos limites de resistência à tração (LRT) em ksi (1000 lb/pol²).

Tabela 2 - Resistência mecânica dos ferros fundidos cinzentos

Classe	Resistência mecânica (kgf/mm ²)	Resistência mecânica (MPa)
20	14,0	140
25	17,5	175
30	21,0	210
35	24,5	245
40	28,9	270
50	35,0	340
60	42,0	410

Fonte: MOREIRA, 2005.

A maioria das empresas voltadas para o mercado de reposição produz discos de freio em ferro fundido cinzento classe FC20, atendendo normalmente aos requisitos de baixo custo, ótima usinabilidade e boa condutividade térmica (GUESSER et al, 2003).

A Tabela 3 abaixo mostra as propriedades mecânicas nos diferentes tipos de ferro fundido cinzento.

⁵ Máxima tensão que um material pode suportar ao ser esticado antes de falhar.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos

Classe	Resistência à tração (MPa)	Resistência à torção (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Dureza (HB)
20	152	179	572	156
25	179	220	669	174
30	214	276	752	210
35	252	334	855	212
40	293	393	965	235

Fonte: D'OLIVEIRA, 2007.

Quando em temperatura eutetóide⁶, ocorre a transformação da austenita⁷ em perlita, resultando em uma estrutura com lamelas de grafita envoltas por uma matriz perlítica, sendo denominada de ferro fundido cinzento perlítico. Caso o resfriamento ocorra a uma velocidade mais lenta no eutetóide, a austenita se transforma em grafita e ferrita, resultando em uma estrutura com lamelas de grafita envoltas em matriz ferrítica, originando o ferro fundido cinzento ferrítico. Entretanto, as velocidades de resfriamento geralmente são intermediárias, resultando em estruturas híbridas. Ocorre decomposição parcial da perlita e a estrutura é, uma matriz perlítica com lamelas de grafita envolvidas por ferrita (CARDOSO, 2005).

Mecanicamente, o ferro fundido cinzento é pouco resistente e frágil em tração, comparado a outros materiais, como mostra a Tabela 4, como consequência de sua microestrutura, as extremidades das lamelas de grafita são afiladas e pontiagudas e podem servir como pontos de concentração de tensões quando uma tensão de tração externa é aplicada. A resistência e a ductilidade⁸ são muito maiores sob cargas de compressão, sendo de 850 MPa e menor que 1 respectivamente. Eles são muito eficientes no amortecimento de energia

⁶ Durante o resfriamento uma fase sólida se transforma em duas outras fases sólidas.

⁷ Fase sólida não magnética constituída de ferro.

⁸ Grau de deformação que um material suporta até o momento de sua fratura.

vibracional. Adicionalmente, os ferros fundidos cinzentos exibem uma elevada resistência ao desgaste. Além disso, no estado fundido, eles possuem alta fluidez na temperatura de vazamento, o que permite a fundição de peças com formas complexas, além disso, a contração do fundido é baixa. Por fim e não menos importante, os ferros fundidos cinzentos estão entre os materiais metálicos mais baratos que existem (CALLISTER, 2008).

Tabela 4 - Limite de Resistência à Tração de diferentes materiais

Material	Limite de Resistência à Tração (MPa)
Ferro Fundido Cinzento	250
Aço 1020	380
Níquel	480
Titânio	520

Fonte: CALLISTER, 2008.

Ferro fundido cinzento tem boa condutividade térmica devido à fase grafita, que é um excelente condutor térmico. Lamelas de grafita estão interligadas e dispostas em forma de placas, constituindo um caminho fácil para a rápida dissipação de calor (CUEVA et al, 2003). (B)

Caso a característica do ferro fundido cinzento de conduzir calor seja aumentada, ou seja, discos de freio com condutividade térmica melhorada, a resistência à trincas térmicas aumenta, possibilitando aumento do tempo de vida útil do disco assim como o seu desempenho (ANGELONI, 2005).

A Tabela 5 a seguir identifica a condutividade térmica dos distintos tipos de ferro fundido em determinadas temperaturas.

Tabela 5 - Condutividade térmica dos diferentes tipos de ferro fundido

Condutividade Térmica (W/(m.K))	Ferro Fundido Cinzento	Ferro Fundido Nodular	Ferro Fundido Vermicular
a 100°C	49	32	41
a 200°C	47	35	44
a 300°C	45	33	41
a 400°C	43	31	38
a 500°C	40	29	35

Fonte: OTT, 1999.

A Figura 10 demonstra a fase grafita presente no ferro cinzento na forma de lamelas, mais escuras, envoltas em uma matriz de ferrita (região mais clara).



Figura 10 - Fotomicrografia do ferro fundido cinzento
Fonte: PEIXOTO et al, 2015.

A transferência de calor nos ferros fundidos sofre a influência da distribuição, do tamanho e da morfologia da fase de grafita, já que esta possui maior condutividade térmica que a matriz. A condutividade térmica é proporcional à razão entre a área superficial do ferro fundido e seu volume, logo o ferro fundido com grafita nodular apresentar menor condutividade que o vermicular, e este é menos condutor que o cinzento (MALUF et al, 2006).

A Figura 11 a seguir demonstra a morfologia, tamanho e distribuição da grafita nos diferentes tipos de ferro fundido, atacados com Nital⁹ 2%.

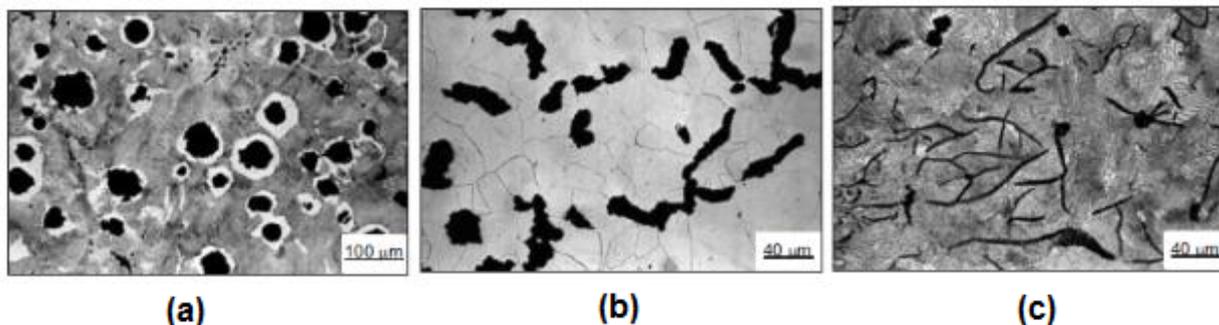


Figura 11 - Ferro fundido: (a) nodular, (b) vermicular e (c) cinzento
Fonte: MALUF et al, 2006.

Segundo estudos, a mudança na composição química dos discos de freio afeta fortemente as propriedades mecânicas e a taxa de desgaste do revestimento e do disco, sugerindo a ativação química do disco com o revestimento durante a frenagem. Pequenas alterações no nível dos elementos de liga mudam o nível de desgaste tanto do revestimento quanto do disco. Estudos também mostraram que, a presença de lamelas de grafita mais finas no material, reduzem o desgaste do disco e do revestimento (ANGELONI, 2005).

Caso a composição química venha a ser modificada, as propriedades mecânicas do disco também serão alteradas. Já em caso de composição química idêntica, é necessário que a taxa de solidificação seja a mesma, não alterando a microestrutura e as propriedades mecânicas do disco (ANGELONI, 2005).

A morfologia apresentada pela grafita no ferro fundido cinzento é ainda subdividida em cinco tipos diferentes, segundo a norma ASTM A247, como mostra a Figura 12.

⁹ Constituído de ácido nítrico e álcool, utilizado em ataque químico de amostras metálicas.

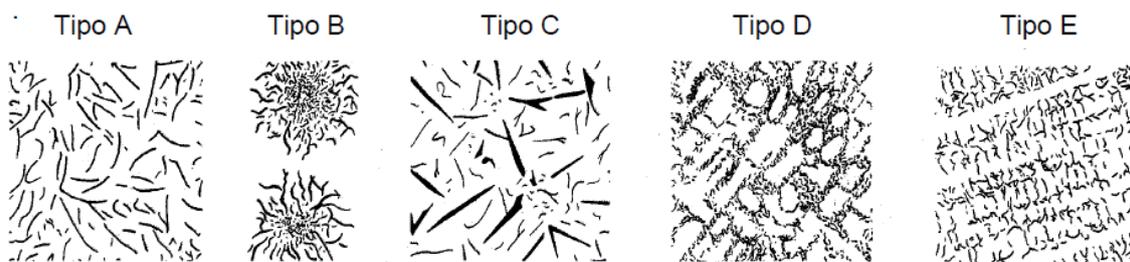


Figura 12 – Diferentes tipos de grafita presentes no ferro fundido cinzento
Fonte: SERBINO, 2005.

A norma ASTM A247, citada anteriormente se refere ao método de teste padrão para avaliação da microestrutura da grafita em ferros fundidos. Trata-se de um tipo de ensaio realizado para que se classifique a grafita em ferros fundidos em termos de tipo, distribuição e tamanho, abrangendo todas as ligas de ferro-carbono que contenham partículas de grafita. Esta norma é disponibilizada principalmente para permitir a emissão de relatórios precisos a respeito da microestrutura de ferros fundidos e facilitar a comparação com os relatórios de outros laboratórios (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS [ASTM], 2010).

A Tabela 6 a seguir indica as características específicas de cada tipo de grafita.

Tabela 6 - Tipos de grafita com sua respectiva característica

Tipo	Característica
A	Placas finas e uniformes, orientação randômica
B	Agrupados por rosetas (radial), orientação randômica
C	Lamelas grosseiras (primárias), orientação randômica
D	Segregada interdendricamente, orientação randômica
E	Segregada interdendricamente, orientação preferencial

Fonte: SERBINO, 2005.

Quando a grafita presente é do tipo A, há mais condições favoráveis para se obter matrizes perlíticas, devido à maior distância de difusão do carbono. Já as matrizes ferríticas tendem a aparecer em grafita de maior super-resfriamento, como nos tipos D e E, onde a distância para difusão do carbono é menor. Neste caso a ferrita é a responsável pela diminuição da resistência. Em grafita do tipo B pode haver ferrita no interior das rosetas de grafita, gerando pontos moles na estrutura, além da tendência à orientação radial dos lamelas ser prejudicial à resistência da seção (SERBINO, 2005).

A eficiência em dissipar calor diminui o gradiente térmico da peça, proporcionando assim um melhor desempenho no âmbito de fadiga térmica, sendo explicada pela morfologia da grafita lamelar. A condutividade térmica é maior na grafita lamelar do que na nodular e na vermicular, pois a condutividade paralela ao seu plano basal é cerca de quatro vezes maior em relação ao seu plano prismático, além da conectividade do esqueleto da grafita lamelar, como pode ser verificado na Figura 13 (SERBINO, 2005).

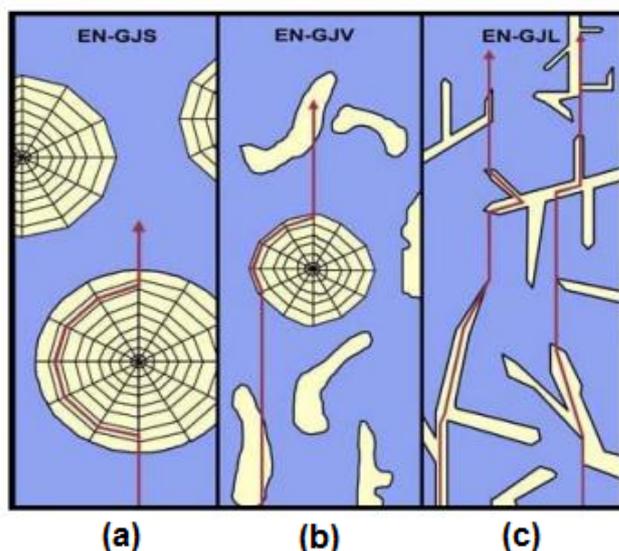


Figura 13 - Transporte de calor em fofo (a)nodular, (b)vermicular e (c)lamelar
Fonte: SERBINO, 2005.

Em 1999, Hecht et al (1999) observou que a difusividade térmica¹⁰ dos ferros fundidos é influenciada por uma pequena alteração na composição química dos mesmos, e apresentou uma relação linear entre difusividade térmica e carbono equivalente (comprimento máximo das lamelas de grafita). A dependência linear observada na Figura 14 indica que o aumento de carbono equivalente é o modo mais rápido de melhorar a grafitação¹¹ no ferro fundido cinzento, tanto para amostras tiradas do disco quanto para amostras obtidas a partir de blocos padrão fundidos (YAMADA & KURIKUMA, 1998) apud (MALUF et al, 2006).

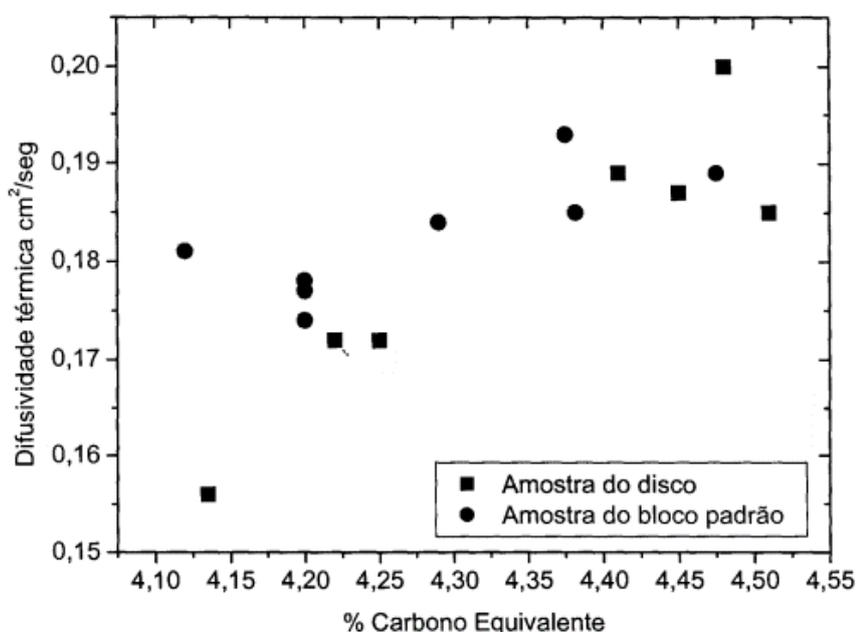


Figura 14 - Gráfico da difusividade térmica vs carbono equivalente
Fonte: ANGELONI, 2005.

Também foi notado por Hecht et al. (1999) que, a difusividade térmica dos ferros fundidos é reduzida com o aumento da temperatura até 500°C, e que acima desta temperatura a diferença notada na difusividade de ligas com valores similares em 500°C é reduzida. Tais dados sugerem que, pode-se alcançar alta

¹⁰ Indica como o calor se difunde através de um material, o quão rapidamente um corpo se ajusta por inteiro à temperatura de sua volta.

¹¹ Transformação de carbonetos metálicos em grafite

difusividade e vantagens térmicas através do controle do processo de discos de freio de ferro fundido cinzento com lamelas de grafita mais longas (MALUF et al, 2006).

A morfologia das lamelas de grafita recebe influência da taxa de solidificação, logo diferentes configurações dos moldes de fundição, tais como, o número de núcleos, o tipo de areia de moldagem e um novo processo ou design de componente, podem causar uma mudança, mesmo que pequena, na morfologia da grafita. Sendo assim, a propriedade de transferência de calor do material também é afetada, já que está relacionada com a área superficial e o volume da grafita, sabendo-se que, quanto maior o comprimento da lamela, maior a difusividade e condutividade térmica do ferro fundido cinzento (HECHT et al, 1999) apud (MALUF et al, 2006).

A maioria dos discos de freio são produzidos em ferro fundido cinzento com matriz perlítica, pois como a perlita consiste em lamelas intercaladas de fase ferrita e cementita (Fe_3C), resulta em uma matriz com resistência mecânica mais elevada (OMEROD, 1978) apud (MALUF et al, 2006).

Diferentemente dos aços, as inclusões¹² de sulfeto de manganês no ferro fundido cinzento são obtidas propositadamente, com intuito de melhorar a usinabilidade, sendo que tais inclusões surgem como resultado do processo de fabricação em fornos cubilô. Para que o enxofre presente no coque e na sucata não combine com o ferro formando inclusões de sulfeto de ferro com baixo ponto de fusão, é adicionado manganês para formar inclusões de sulfeto de manganês, sendo estas mais estáveis (PEREIRA, BOEHS e GUESSER, 2005).

¹² Pequenas partículas dispersas na matriz metálica.

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 MATERIAIS

Neste trabalho foram utilizadas amostras retiradas de discos de freio automotivo usados, com 42.750 km rodados, fornecidos pela empresa Precisão Auto Center, e de discos novos, que foram adquiridos pela mesma empresa, ambos dianteiros, ventilados e do modelo Palio 2013.



Figura 15 - Discos de freio e pastilhas usados com 42.750 Km rodados

Fonte: Autoria própria.

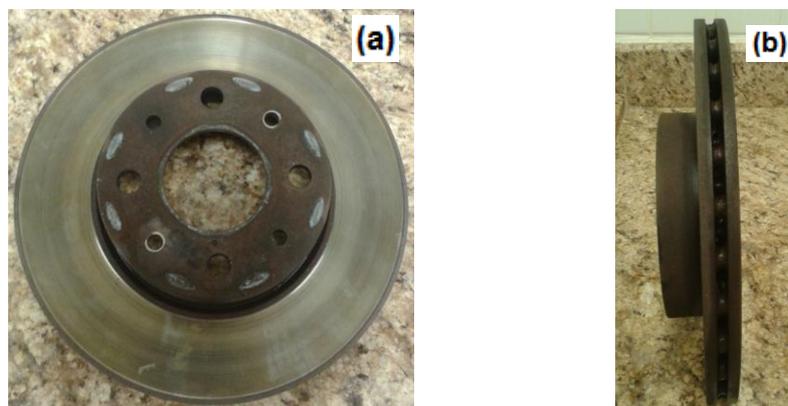


Figura 16 - Vistas (a) frontal e (b) de perfil do disco com 42.750 Km rodados

Fonte: Autoria própria.



Figura 17 - Disco novo dianteiro
Fonte: Autoria própria.

3.2 MÉTODO

Para o estudo em questão foi selecionado um disco do par de discos usados e um do par de novos, sendo que para tal seleção foi considerada a pista com maior profundidade de desgaste para os discos usados, já que permite a observação de uma região mais interna da estrutura do material, e para a escolha dos discos novos foi considerada a pista com menor espessura, possibilitando a análise de uma região mais interna da microestrutura e permitindo uma maior aproximação para com a região observada no disco usado.

Definidos os discos a serem trabalhados, estes foram cortados ao meio por uma cortadeira manual em uma serralheria, como mostram as Figuras 18 e 19 para o disco usado e as Figuras 20 e 21 para o novo, devido a impossibilidade do corte destes na cortadeira metalográfica Fortel CFIII, disponibilizada pela universidade, já que a geometria dos discos não permitiu o fechamento da tampa de segurança do equipamento para realização do corte.



Figura 18 - Corte ao meio do disco usado
Fonte: Autoria própria



Figura 19 - Disco usado cortado ao meio
Fonte: Autoria própria



Figura 20 - Corte ao meio do disco novo
Fonte: Autoria própria



Figura 21 - Disco novo cortado ao meio
Fonte: Autoria própria

A Figura 22 (A) e (B) a seguir mostra a impossibilidade de corte dos discos ainda inteiros na cortadeira metalográfica Fortel CFIII.

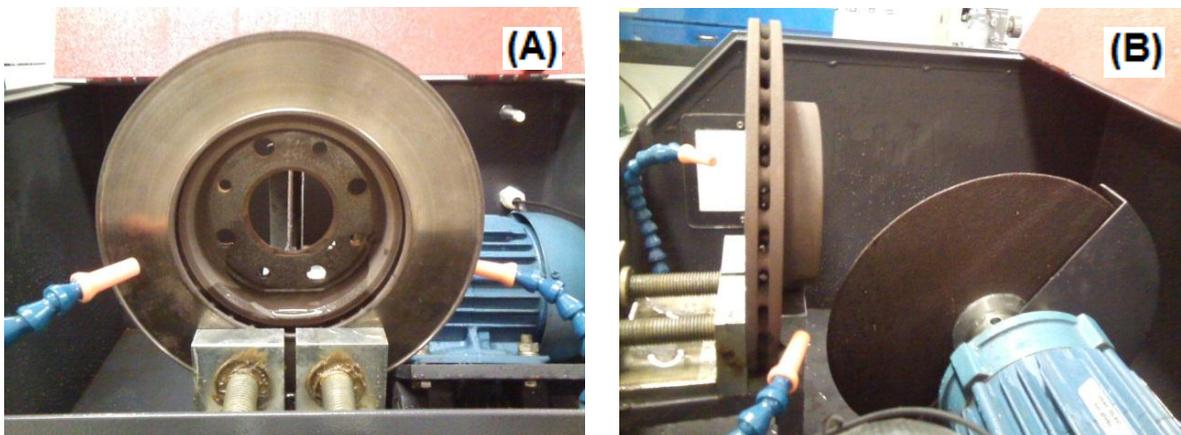


Figura 22 - (A) e (B) Posicionamento do disco na cortadeira Fortel CFIII
Fonte: Autoria própria

Após cortados ao meio, cada metade dos discos foi seccionada em três partes iguais, como pode ser observado nas Figuras 25 e 26, sendo que os cortes foram feitos na cortadeira metalográfica Fortel CFIII, identificada na Figura 23.



Figura 23 - Cortadeira metalográfica Fortel CFIII
Fonte: Autoria própria

A Figura 24 mostra como foi realizado o corte da metade do disco usado na cortadeira.

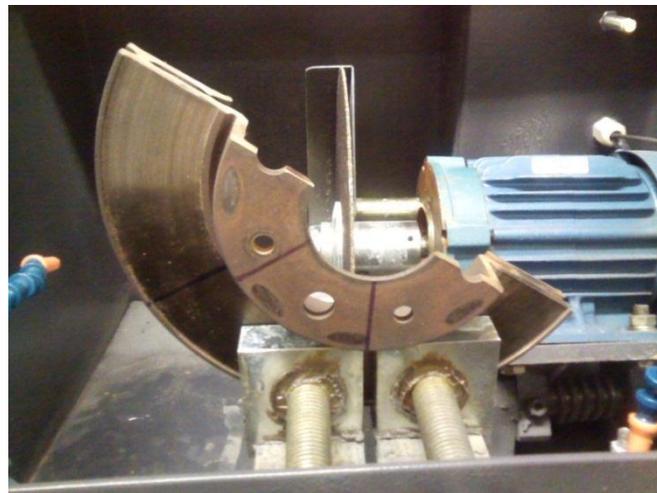


Figura 24 - Corte do disco usado em três partes na cortadeira Fortel CFIII
com refrigeração à água
Fonte: Autoria própria



Figura 25 - Disco usado cortado em três partes iguais
Fonte: Autoria própria



Figura 26 - Disco novo cortado em três partes iguais
Fonte: Autoria própria

Após cortadas as metades dos discos, o processo resultou em seis partes por disco, como mostram as Figuras 27 e 28, totalizando em doze amostras.



Figura 27 - Disco usado cortado em seis partes iguais
Fonte: Aatoria própria



Figura 28 - Disco novo cortado em seis partes iguais
Fonte: Aatoria própria

Devido a dificuldades encontradas durante o lixamento de cada um sexto dos discos, em virtude do tamanho e peso da fração, foi retirada uma parte de cada um sexto, utilizando-se uma esmerilhadeira manual da marca Makita, com intuito de facilitar o lixamento, polimento e manuseio das amostras. A Figura 29 a seguir mostra como foi realizado o procedimento de corte.



Figura 29 - Corte de uma parte de um sexto do disco usado
Fonte: Autoria própria

As partes seccionadas de cada um sexto foram determinadas de modo a se obter uma melhor distribuição das regiões dos discos, de maneira que tais partes tivessem um melhor distanciamento entre si, como mostram as Figuras 30 e 31, permitindo a análise microscópica de distintas regiões.



Figura 30 - Distribuição das partes retiradas de cada um sexto (disco usado)
Fonte: Autoria própria



Figura 31 - Distribuição das partes retiradas de cada um sexto (disco novo)
Fonte: Aatoria própria

Para o lixamento das amostras foram utilizadas as lixas com granulometria 60, 80, 120, 220, 400, 600, 800 e 1200, nesta respectiva ordem. O processo foi totalmente manual, a seco, e consistiu em lixar as amostras nas lixas anteriormente mencionadas, com decrescimento da granulometria, girando as amostras em 90° a cada lixa subsequente, até o completo desaparecimento dos traços da lixa anterior, sendo que, para se ter a garantia desse total desaparecimento utilizou-se um microscópio estereoscópio binocular da marca Physis, com aumento de quatro vezes, como mostra a Figura 32, o qual permitiu maior aproximação e melhor visualização da superfície lixada.



Figura 32 - Microscópio Estereoscópio Binocular Physis
Fonte: Aatoria própria

Tal procedimento foi essencial para se eliminar riscos e marcas profundas da superfície das amostras, deixando-as com um melhor acabamento e preparando-as para a etapa posterior de polimento. A Figura 33 mostra como foi realizada a etapa de lixamento.



Figura 33 - Lixamento manual das amostras
Fonte: A autoria própria

Posteriormente ao lixamento as amostras passaram pela etapa de polimento, cujo processo utilizado foi o processo mecânico, realizado em uma politriz Fortel modelo PLF, mostrada na Figura 34, utilizando-se como agente polidor a alumina, a qual permitiu um melhor acabamento superficial das amostras. Nas Figuras 35 e 36 pode-se observar as amostras após o polimento.



Figura 34 - Politriz Fortel modelo PLF
Fonte: A autoria própria



Figura 35 - Amostras polidas do disco usado
Fonte: Autoria própria



Figura 36 - Amostras polidas do disco novo
Fonte: Autoria própria

Após polidas, as amostras foram encaminhadas para serem analisadas e microfotografadas no microscópio óptico da marca Carl Zeiss, conforme Figura 37, porém o formato delas não permitiu o posicionamento e distanciamento adequado das lentes para captura das imagens, sendo necessário o corte de uma parte das amostras (alça) para melhor adaptação ao microscópio. A Figura 38 mostra o procedimento de corte sendo realizado na cortadeira Fortel CFIII.



Figura 37 - Microscópio óptico Carl Zeiss (metalográfico)
Fonte: Autoria própria

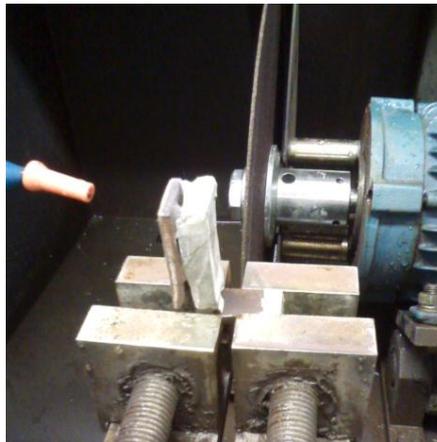


Figura 38 - Posicionamento das amostras na cortadeira para retirada da alça com refrigeração à água
Fonte: Autoria própria



Figura 39 - Amostra com alça retirada
Fonte: Autoria própria

Na Figura 40 a seguir pode-se observar como ficaram as amostras após o corte das alças.



Figura 40 - Amostras polidas com as alças retiradas
Fonte: Autoria própria

Com a retirada das alças das amostras, estas foram corretamente posicionadas no microscópio óptico e microfotografadas, primeiramente as amostras do disco novo, utilizando-se as lentes objetivas de 10x e 100x, e posteriormente as amostras do disco usado utilizando-se as mesmas lentes anteriormente citadas.

Todas as amostras tiveram três regiões microfotografadas, que são: canto interno (1), centro (2) e canto externo (3), sendo que o canto interno e externo foram estipulados considerando um recuo de aproximadamente 5 mm da extremidade para o centro da amostra, e estando o centro a aproximadamente 25 mm das extremidades para os discos novo e usado.

As regiões microfotografadas podem ser observadas na Figura 41.

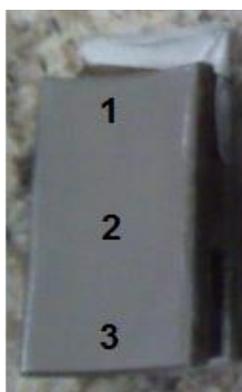


Figura 41 - Regiões microfotografadas nas amostras
Fonte: Autoria própria

Feita a análise microscópica após o polimento, foi realizado o ataque químico nas amostras, utilizando-se como reagente ácido o Nital a 2% e baseando-se no método de ataque químico por imersão, onde as superfícies das amostras foram imersas na solução de Nital durante 10 segundos, sendo em seguida lavadas rapidamente com álcool isopropílico e secadas com um jato de ar quente fornecido por um secador. Cada amostra após sofrer o ataque químico foi analisada no microscópio óptico para ser microfotografada, já que o reagente permitiu a visualização das diferentes fases presentes na microestrutura do material.

Para se ter uma melhor noção do tamanho das grafitas presentes nas amostras, foram inseridas linhas de grade nas microfotografias registradas pelo microscópio óptico, para assim estabelecer quantos pixels compõem a escala de 20 μm . Feita a inserção foi determinado que em uma escala de 20 μm há aproximadamente 145 pixels. Dessa forma foi possível estipular o tamanho médio de algumas grafitas existentes nos discos, inserindo um retângulo ao redor dessas e obtendo as dimensões deste retângulo na unidade de pixels. Determinadas as dimensões, estas foram transformadas em micrômetro pela relação de 20 μm para 145 pixels, e posteriormente foi calculado o tamanho aproximado das grafitas selecionadas. Para algumas esse tamanho foi equivalente à diagonal do retângulo, ou seja, à hipotenusa de um triângulo retângulo, sendo utilizado para cálculo o Teorema de Pitágoras, cuja soma dos quadrados dos catetos é igual ao quadrado da hipotenusa, conforme mostra a equação 1. Já para outras grafitas o tamanho foi equivalente a um cateto do retângulo ao redor.

$$a^2 + b^2 = c^2 \quad (1)$$

As figuras abaixo mostram como foram inseridos os retângulos ao redor das grafitas nas diferentes amostras.

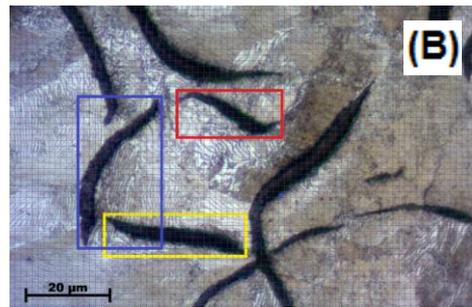
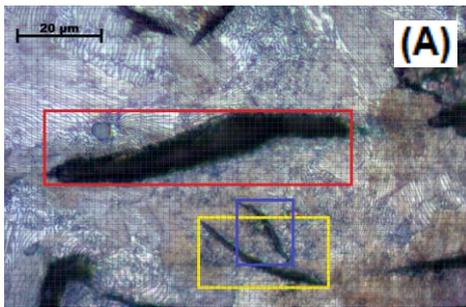


Figura 42 - Grafitas limitadas da amostra (A) 1 e (B) 2
Fonte: Autoria própria

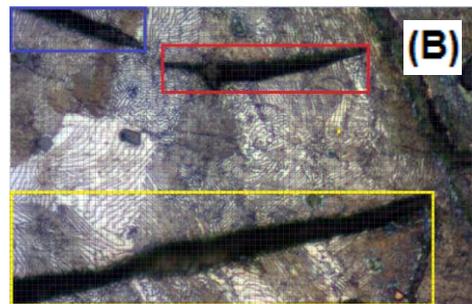
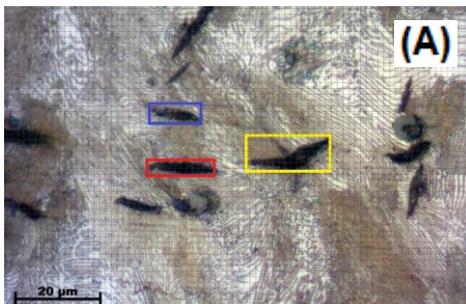


Figura 43 - Grafitas limitadas da amostra (A) 3 e (B) 4
Fonte: Autoria própria

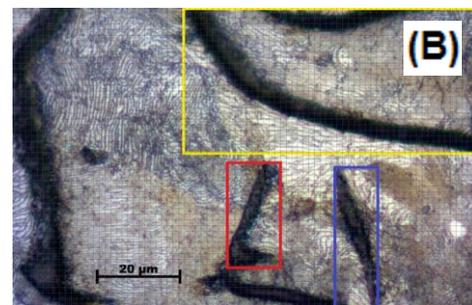
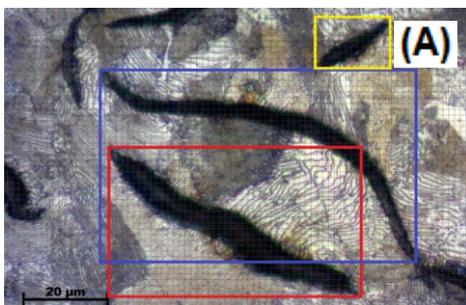


Figura 44 - Grafitas limitadas da amostra (A) 5 e (B) 6
Fonte: Autoria própria

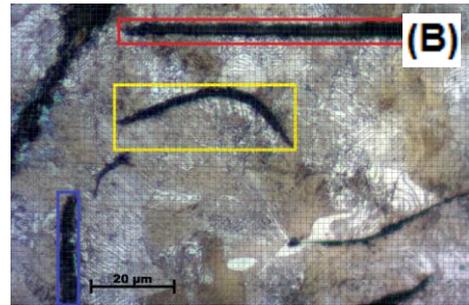
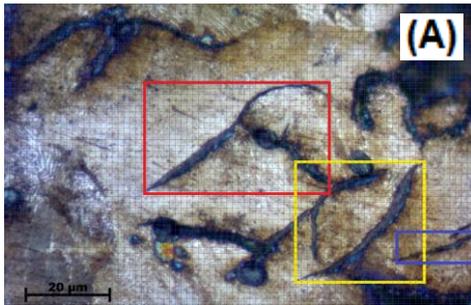


Figura 45 - Grafitas limitadas da amostra (A) 1N e (B) 2N
Fonte: Autoria própria

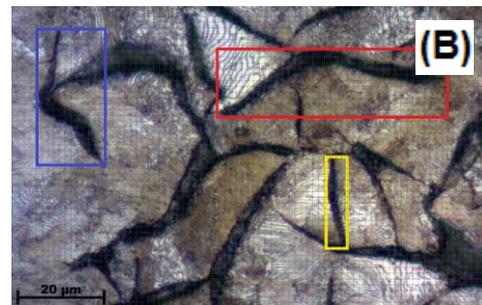
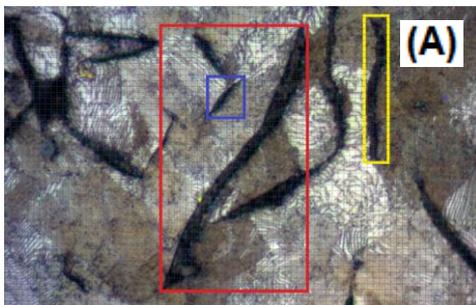


Figura 46 - Grafitas limitadas da amostra (A) 3N e (B) 4N
Fonte: Autoria própria

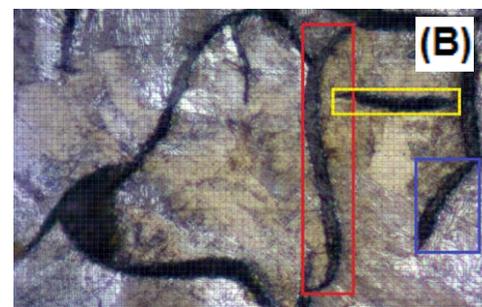
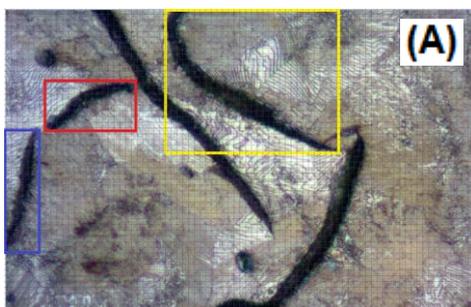


Figura 47 - Grafitas limitadas da amostra (A) 5N e (B) 6N
Fonte: Autoria própria

O cronograma referente ao presente trabalho pode ser verificado no apêndice, ao final deste.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens das microestruturas das amostras sem ataque, registradas pelo microscópio óptico com aumento de 100x, seguem abaixo em uma sequência de figuras, cujas amostras de 1N a 6N correspondem ao disco novo, e as amostras de 1 a 6 correspondem ao disco usado. Tal descrição das amostras foi feita aleatoriamente apenas com intuito de diferenciar as do disco novo com as do disco usado.

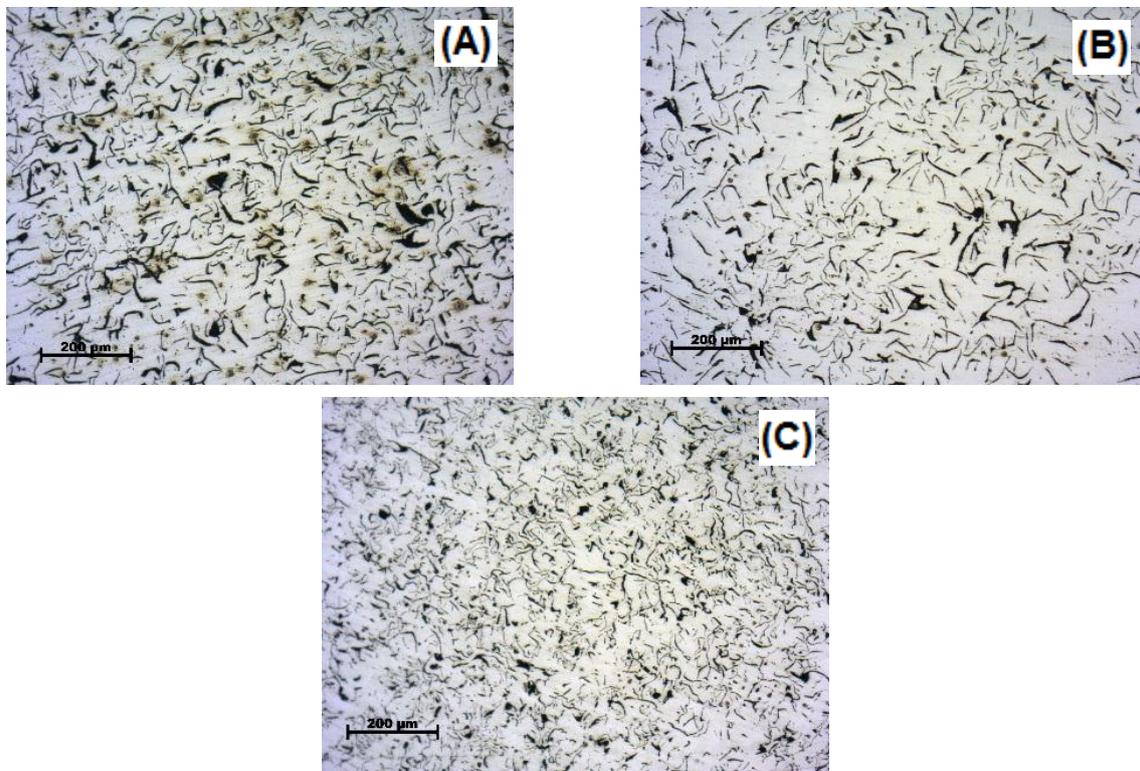


Figura 48 - Microestrutura da amostra 1N, (A)canto interno, (B)centro, (C)canto externo
Fonte: Autoria própria

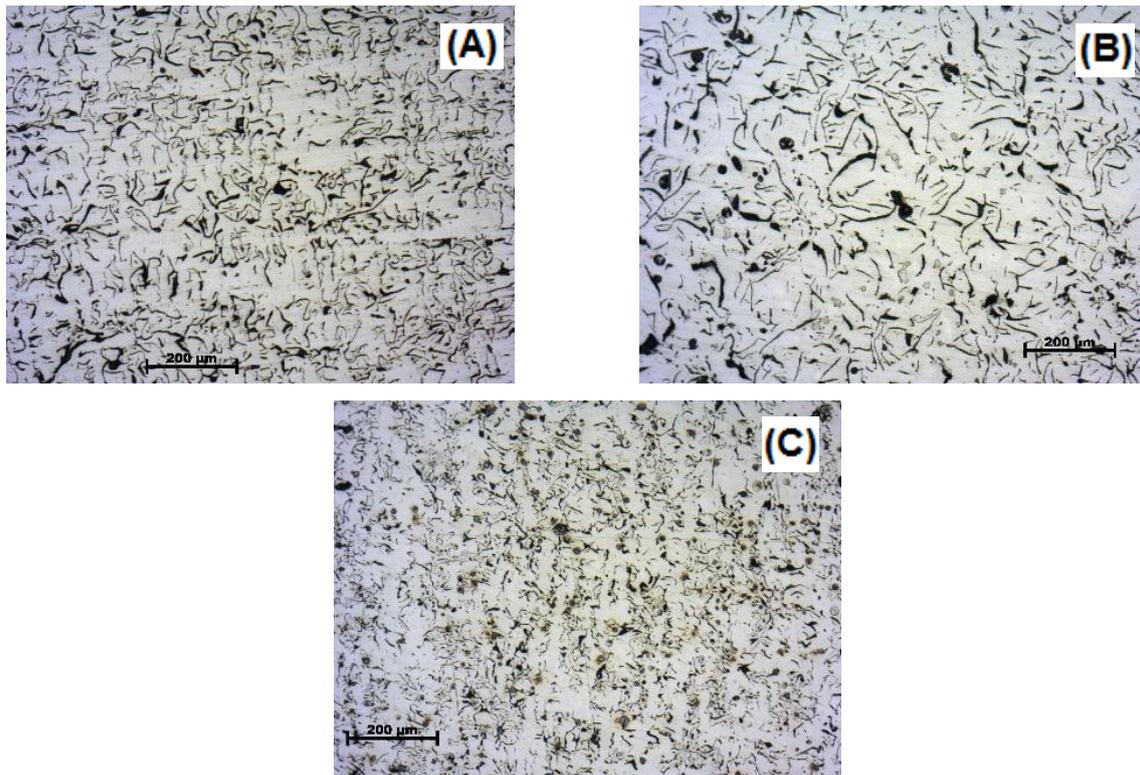


Figura 49 -Microestrutura da amostra 2N, (A)canto interno, (B)centro, (C)canto externo
Fonte: Autoria própria

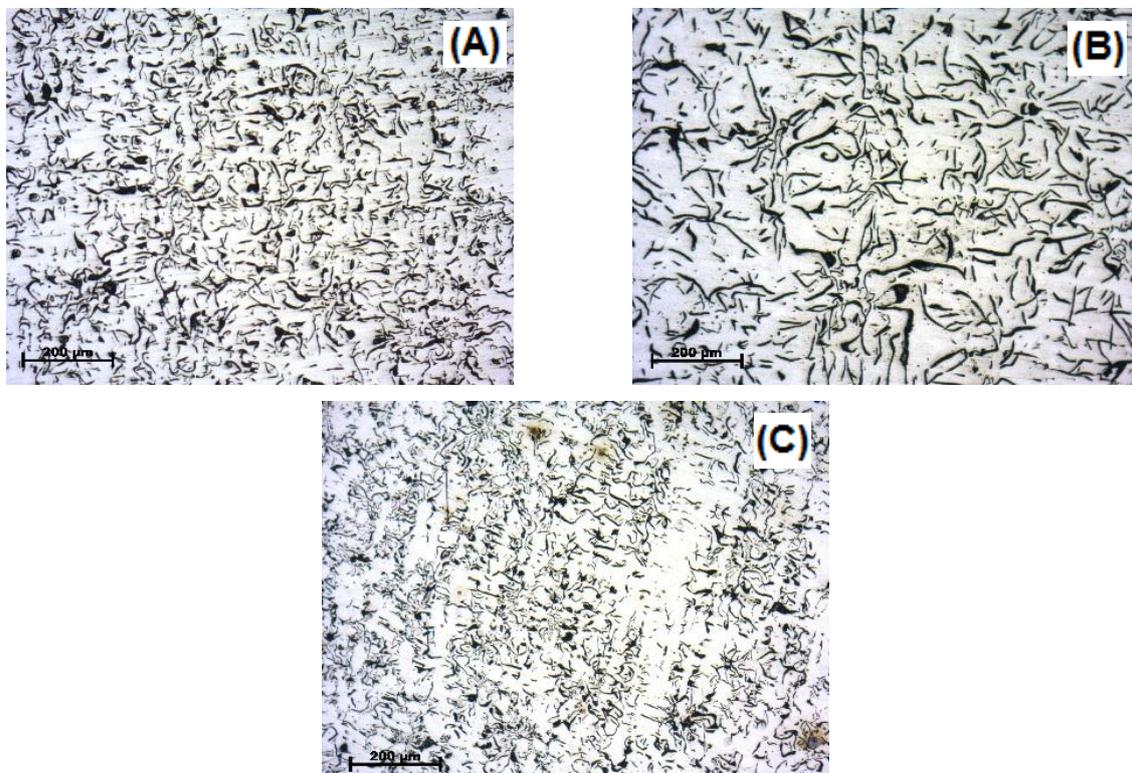


Figura 50 - Microestrutura da amostra 3N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

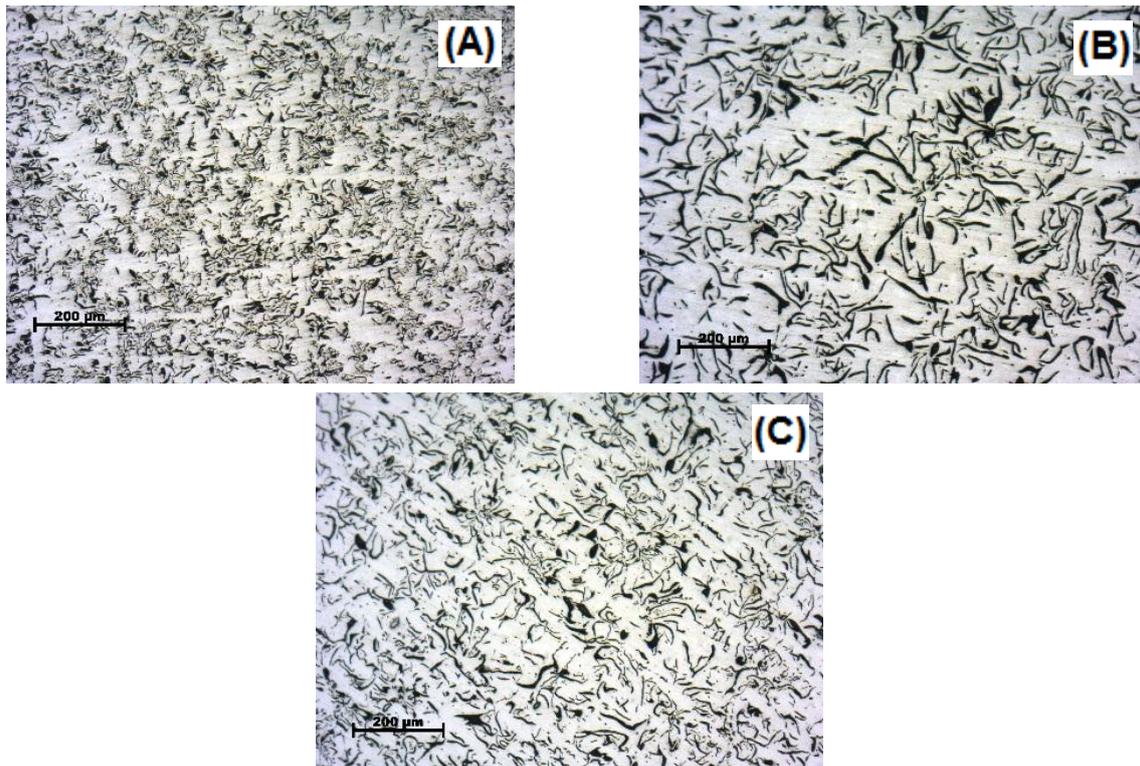


Figura 51 - Microestrutura da amostra 4N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

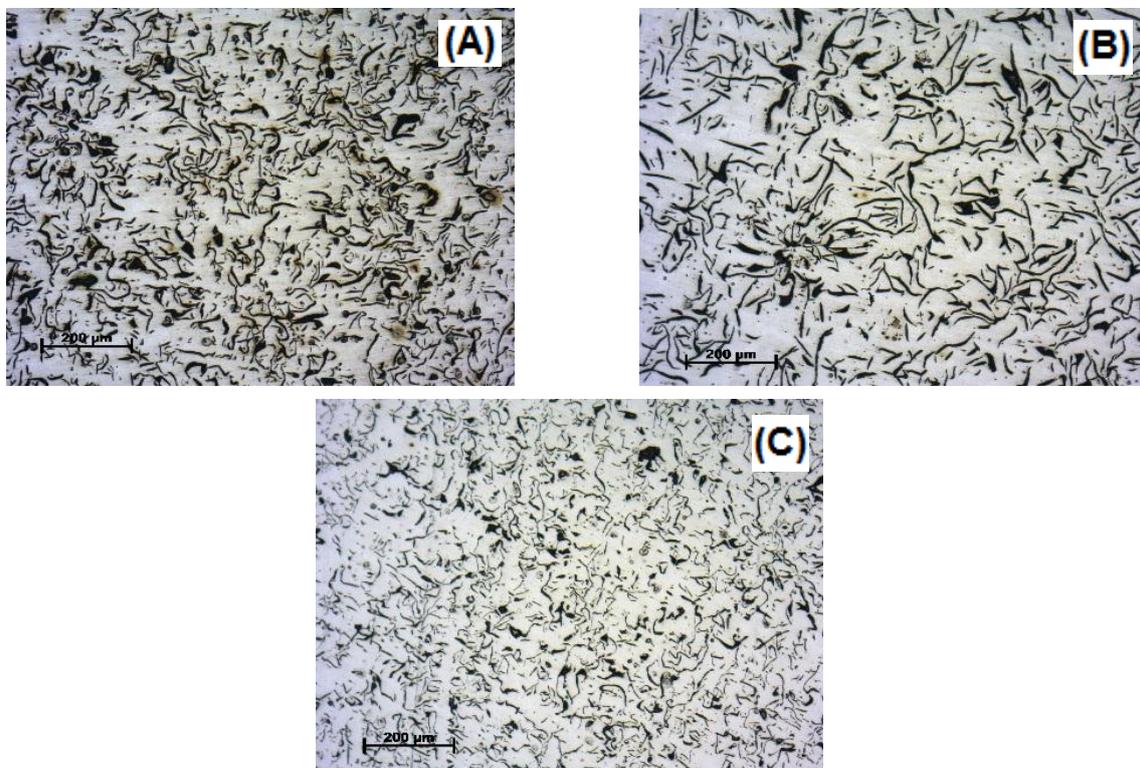


Figura 52 - Microestrutura da amostra 5N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

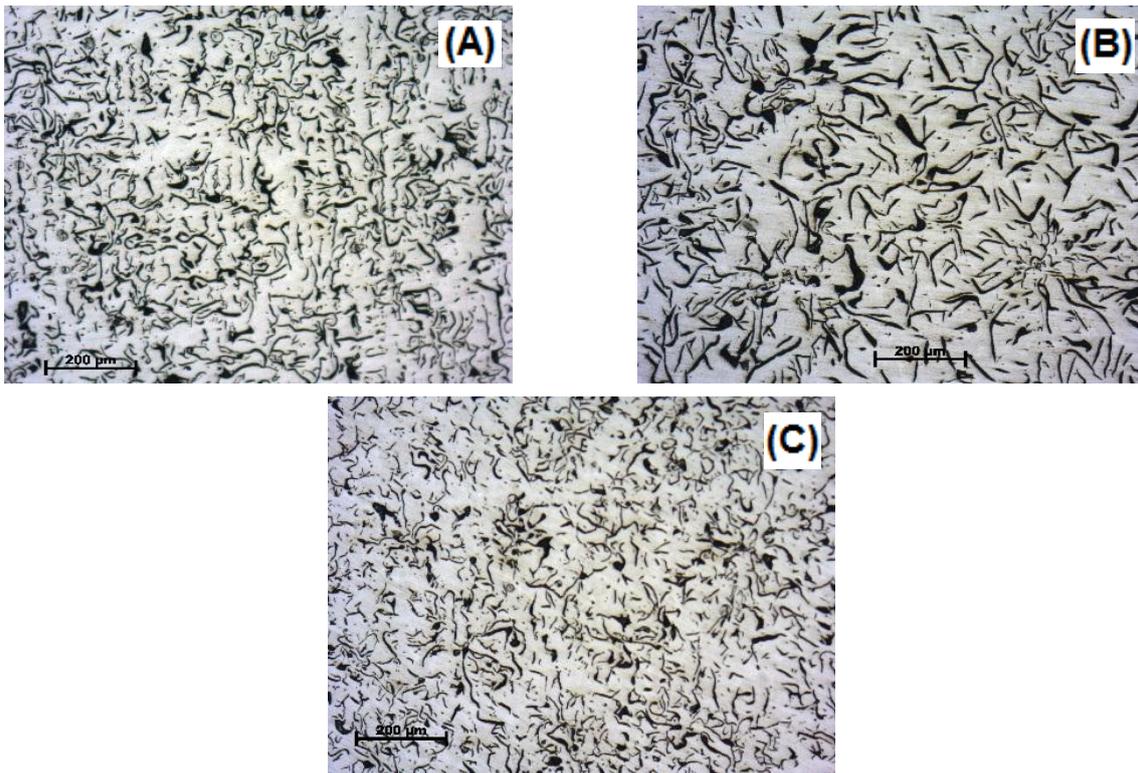


Figura 53 - Microestrutura da amostra 6N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

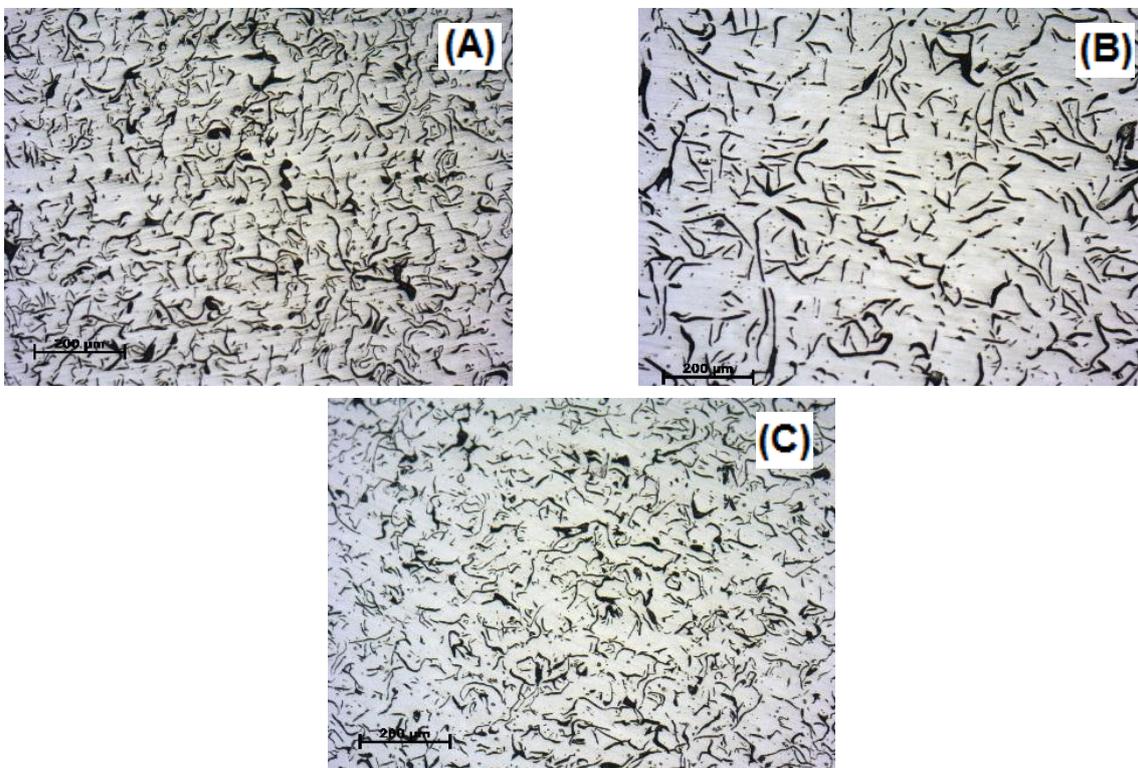


Figura 54 - Microestrutura da amostra 1, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

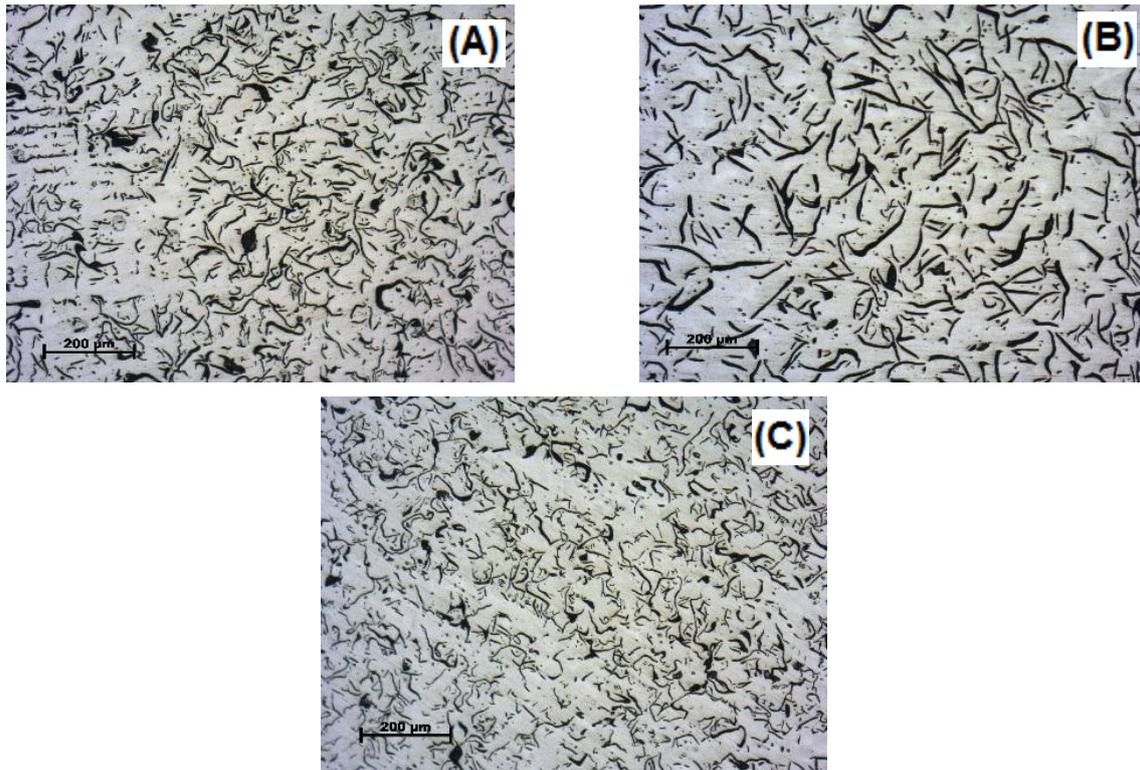


Figura 55 - Microestrutura da amostra 2, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

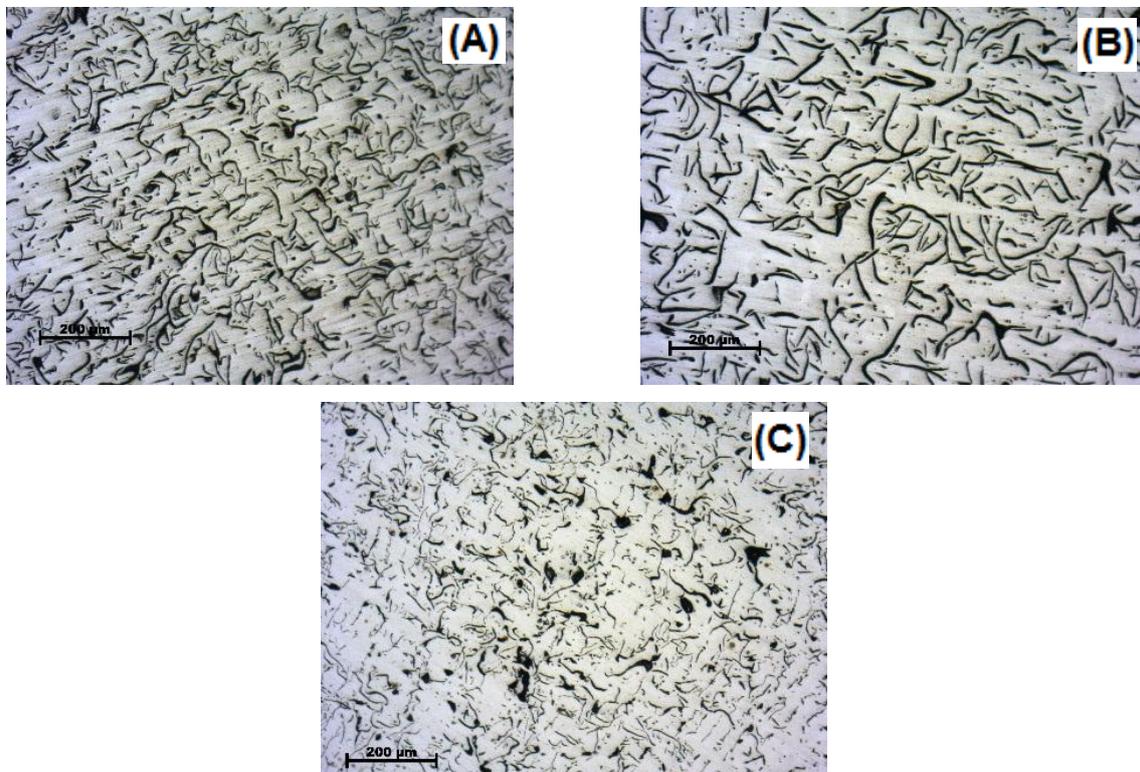


Figura 56 - Microestrutura da amostra 3, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

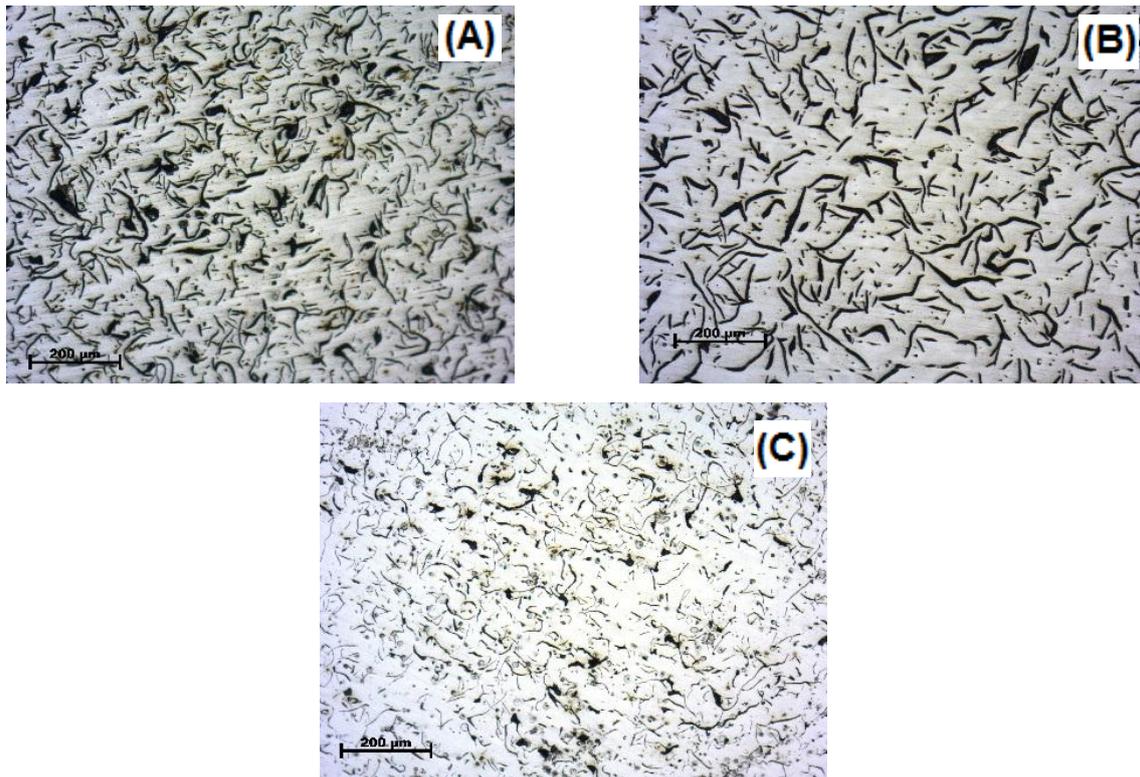


Figura 57 - Microestrutura da amostra 4, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

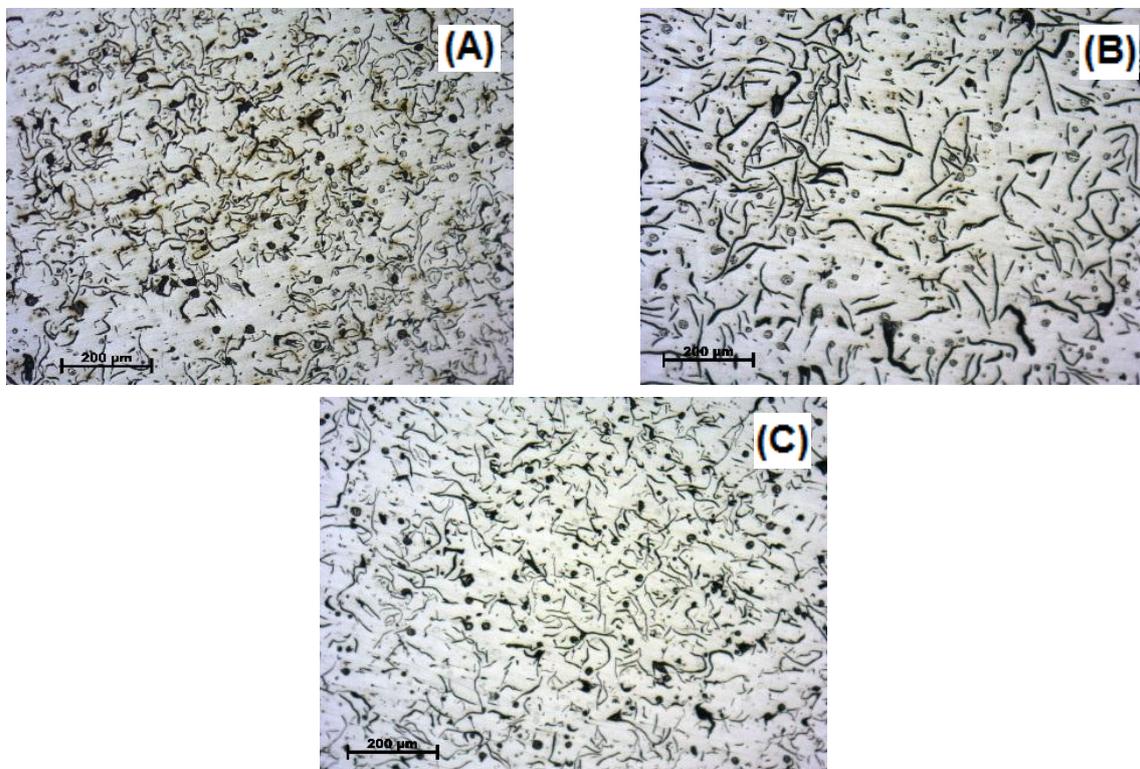


Figura 58 - Microestrutura da amostra 5, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

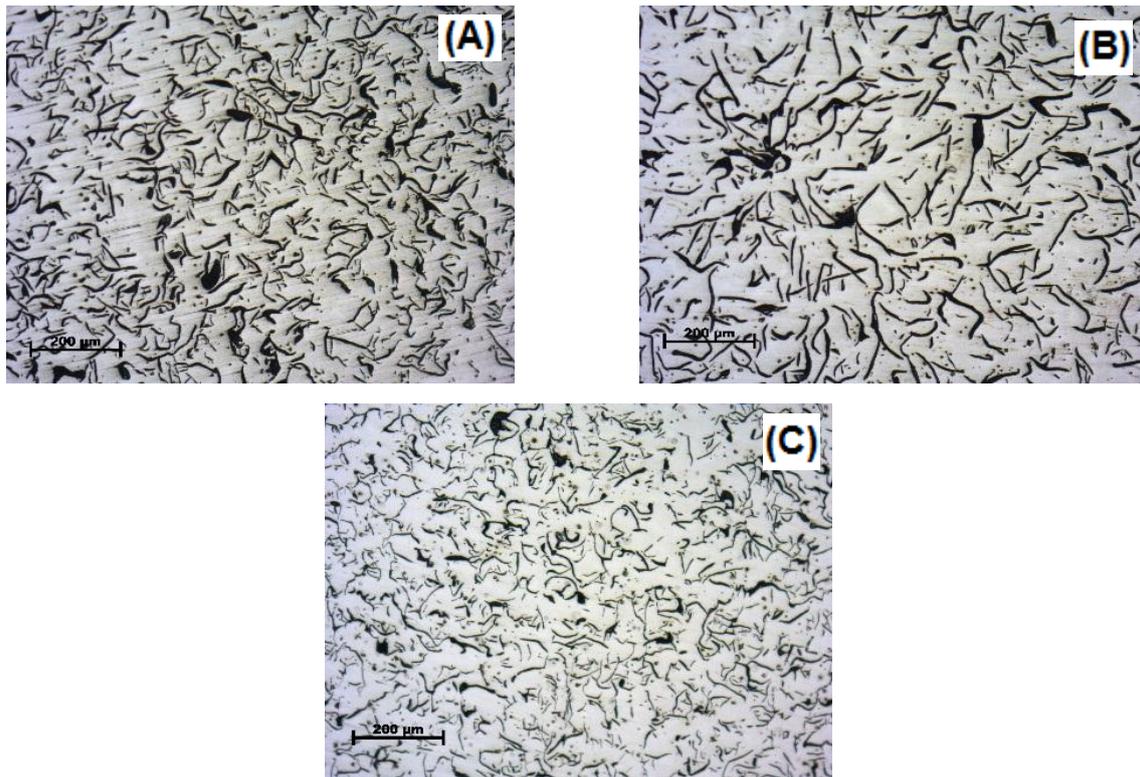


Figura 59 - Microestrutura da amostra 6, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

A sequência de figuras a seguir mostra as imagens registradas pelo microscópio óptico após o ataque químico realizado nas amostras, com aumento de 100x nas regiões 1, 2 e 3, as mesmas registradas antes do ataque.

As amostras de 1N a 6N correspondem ao disco novo enquanto que as amostras de 1 a 6 correspondem ao disco usado.

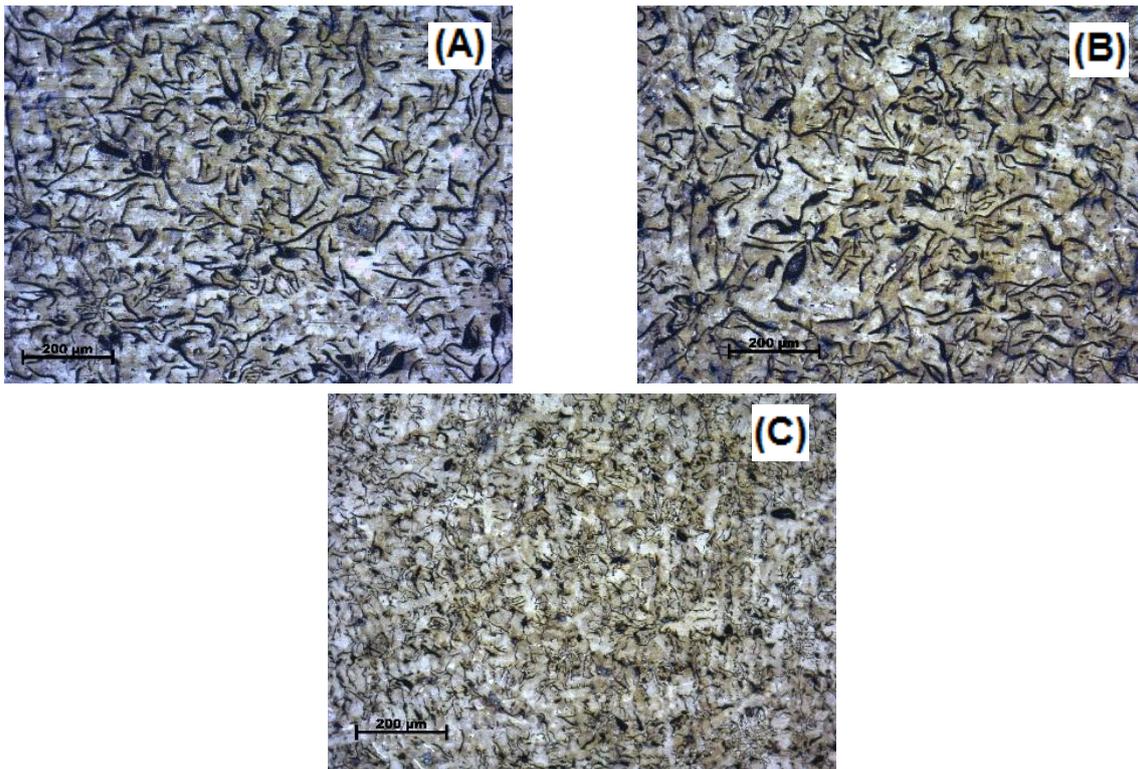


Figura 60 - Microestrutura da amostra 1N (A) canto interior, (B) centro, (C) canto exterior
Fonte: Autoria própria

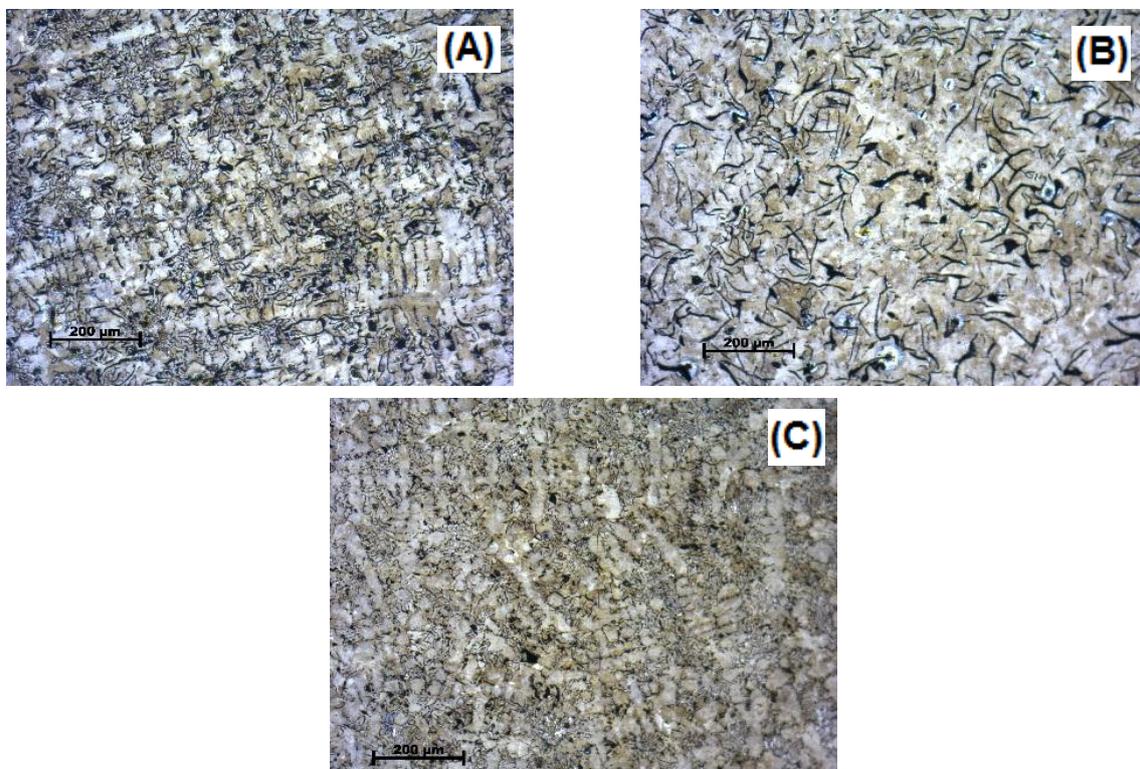


Figura 61 - Microestrutura da amostra 2N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

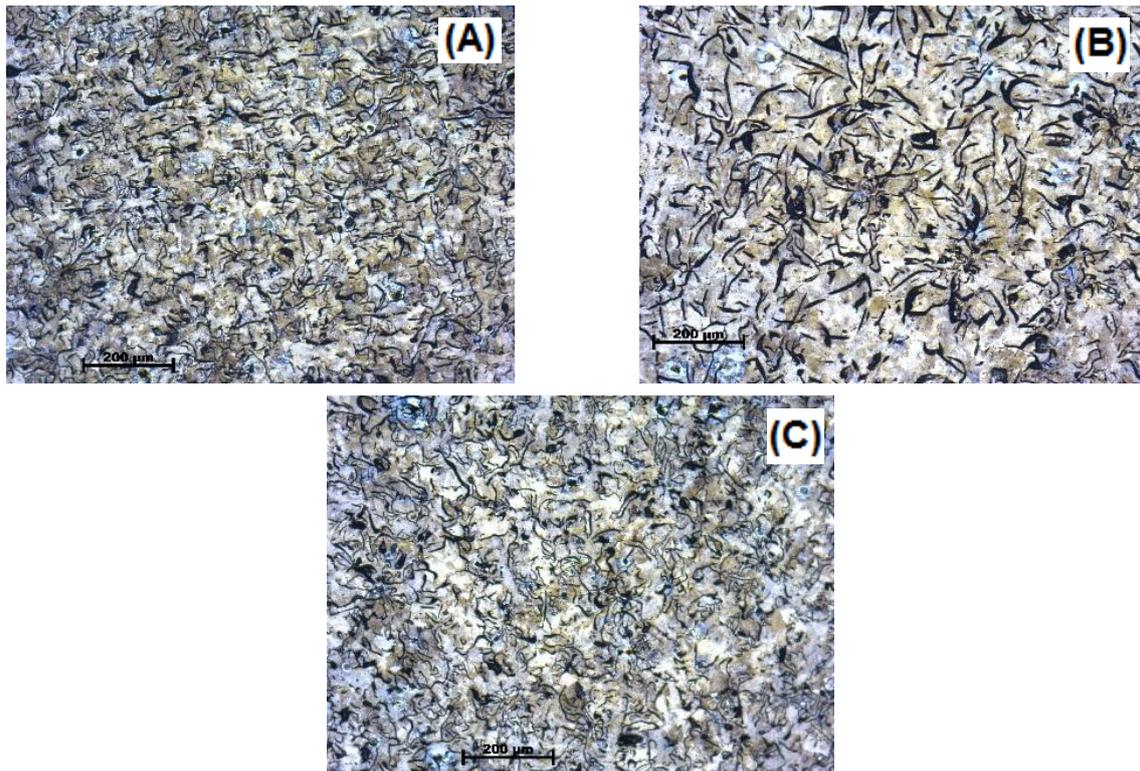


Figura 62 - Microestrutura da amostra 3N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

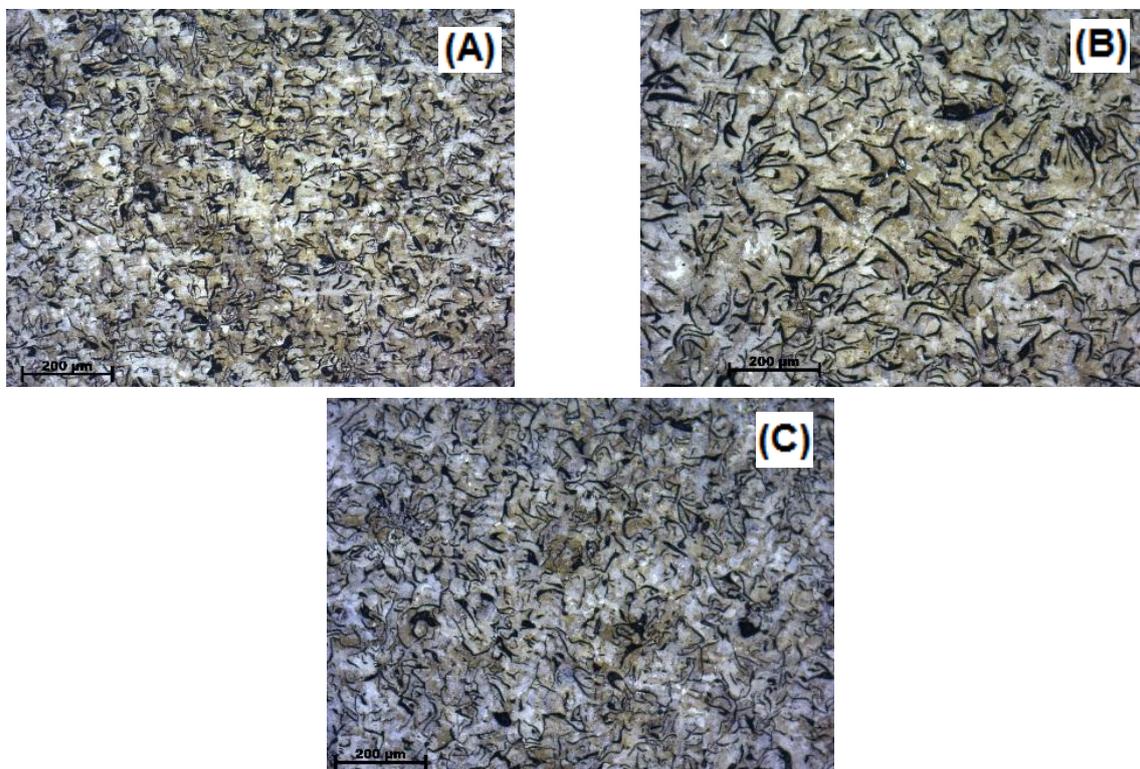


Figura 63 - Microestrutura da amostra 4N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

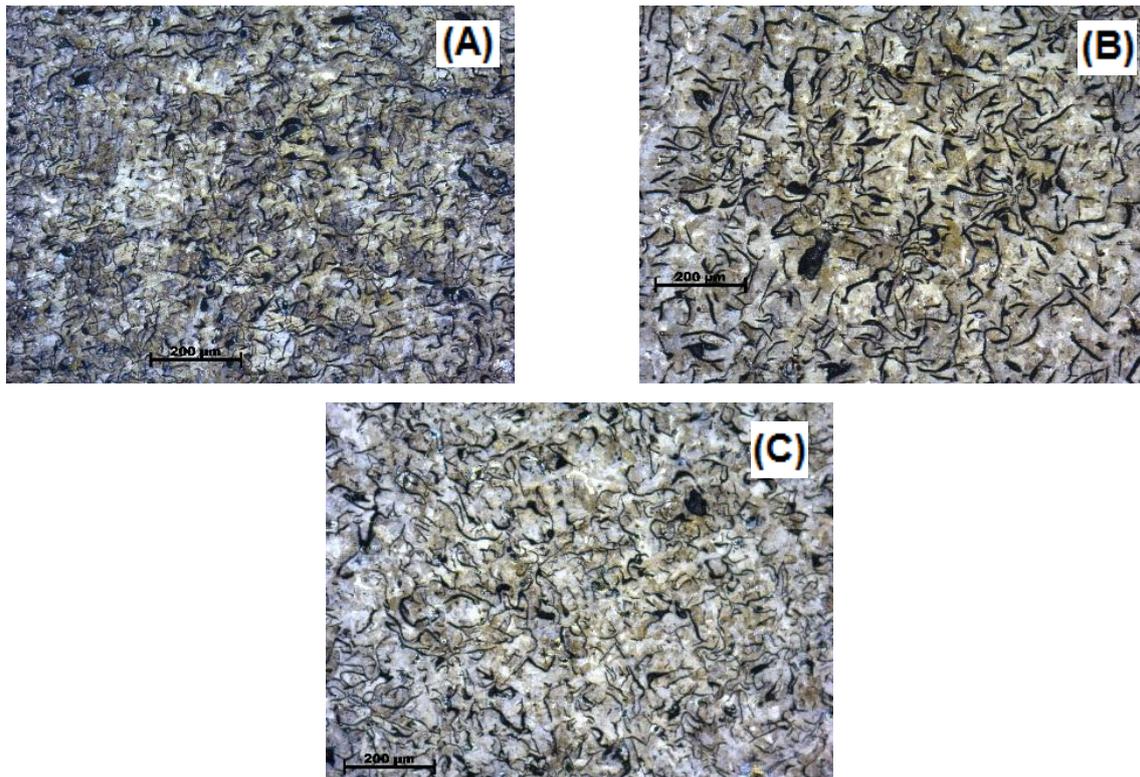


Figura 64 - Microestrutura da amostra 5N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

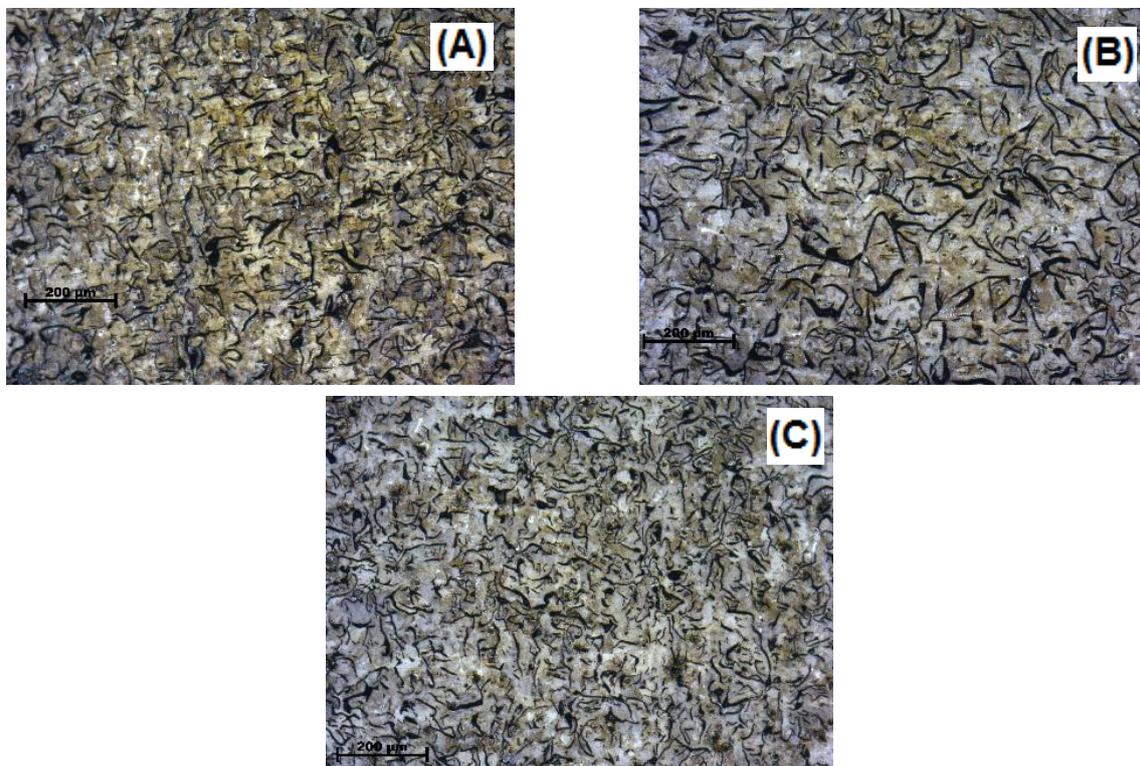


Figura 65 - Microestrutura da amostra 6N, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

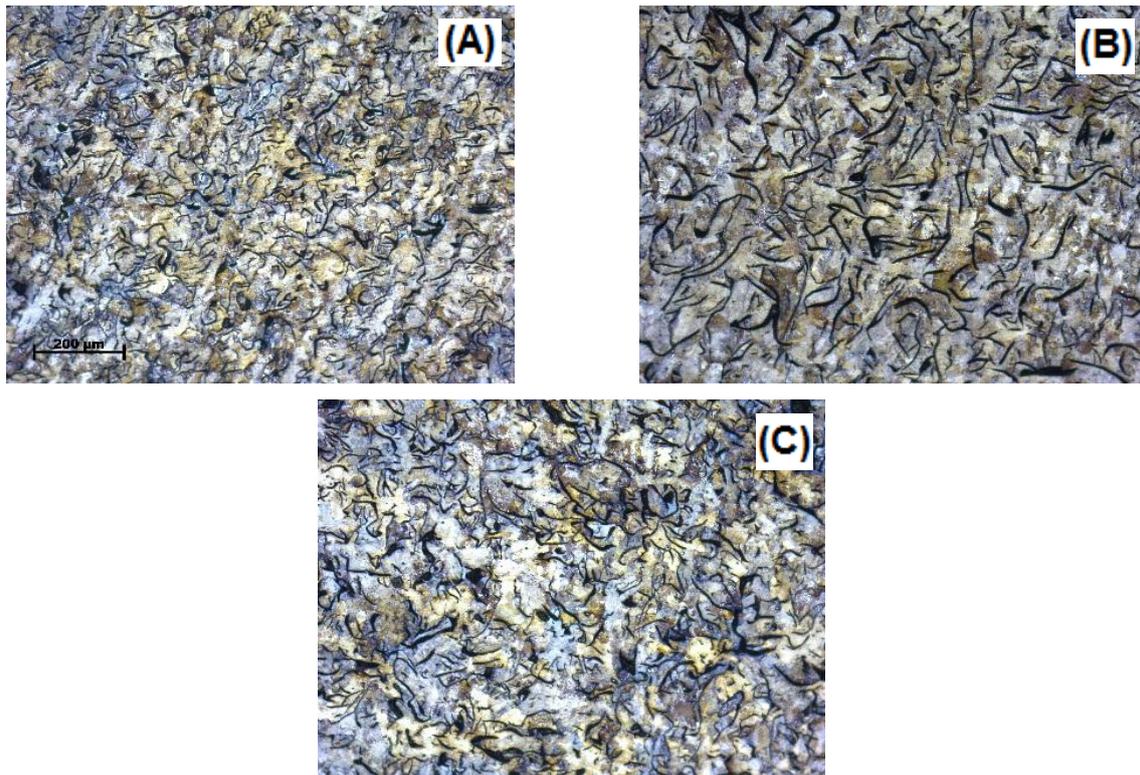


Figura 66 - Microestrutura da amostra 1, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

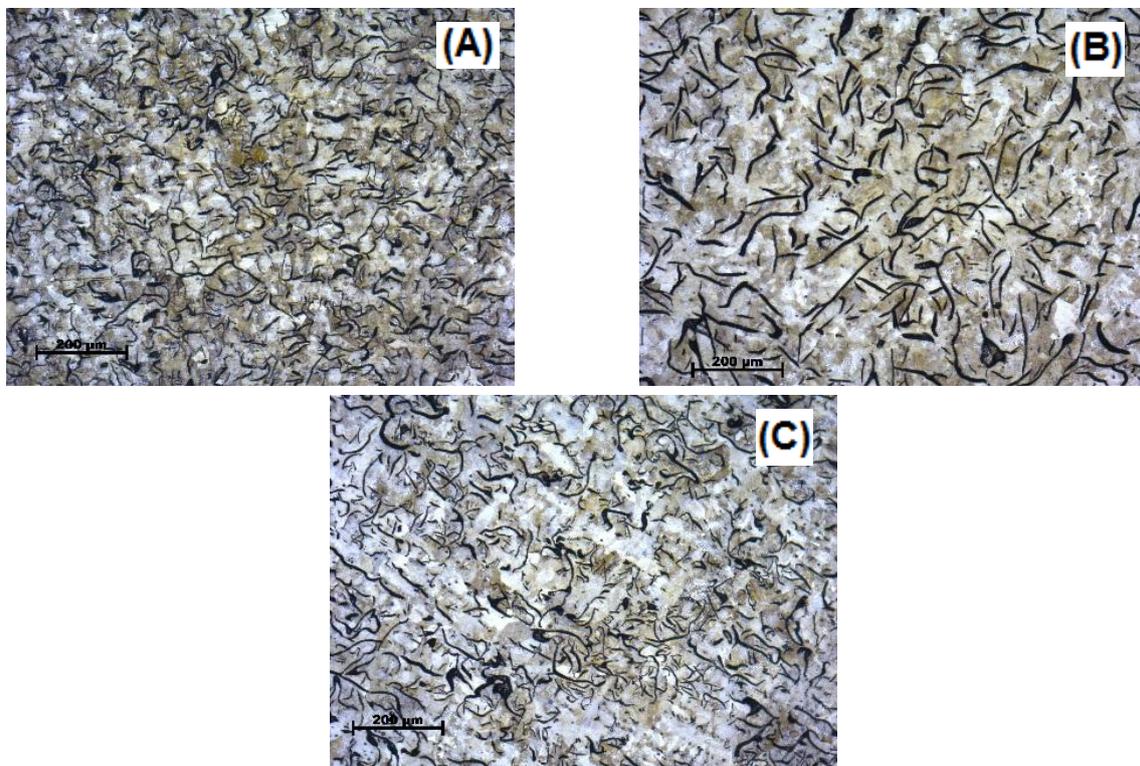


Figura 67 - Microestrutura da amostra 2, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

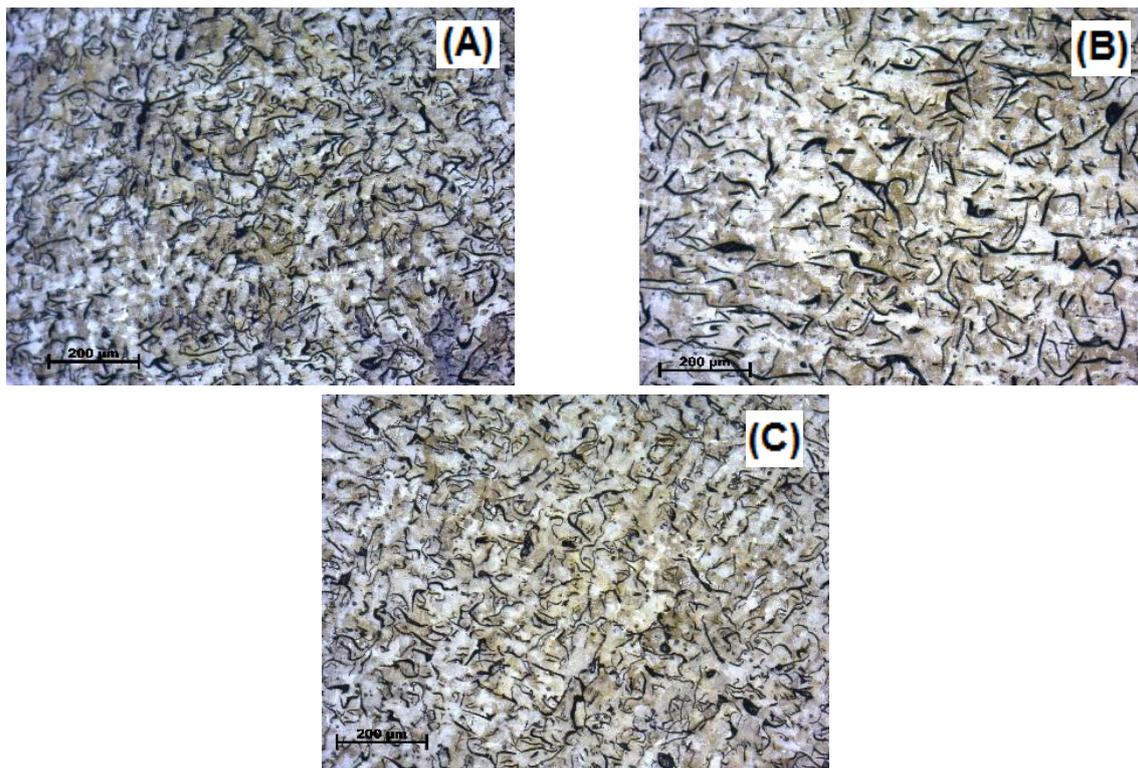


Figura 68 - Microestrutura da amostra 3, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

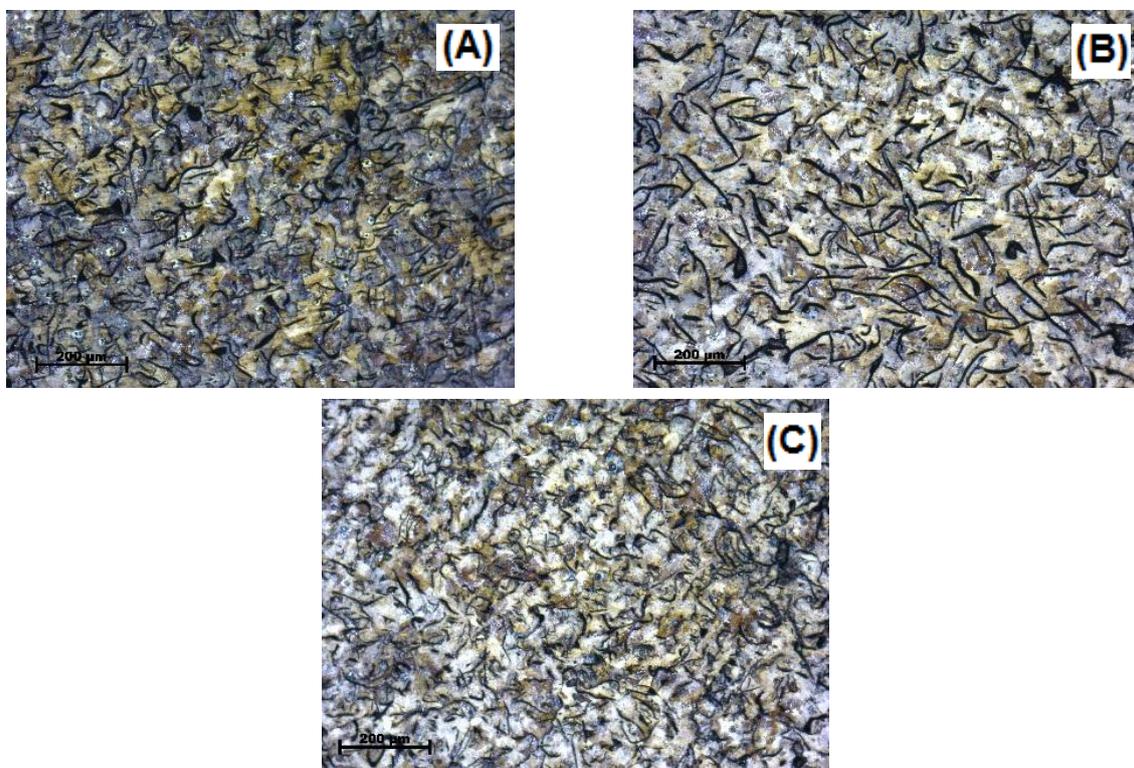


Figura 69 - Microestrutura da amostra 4, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

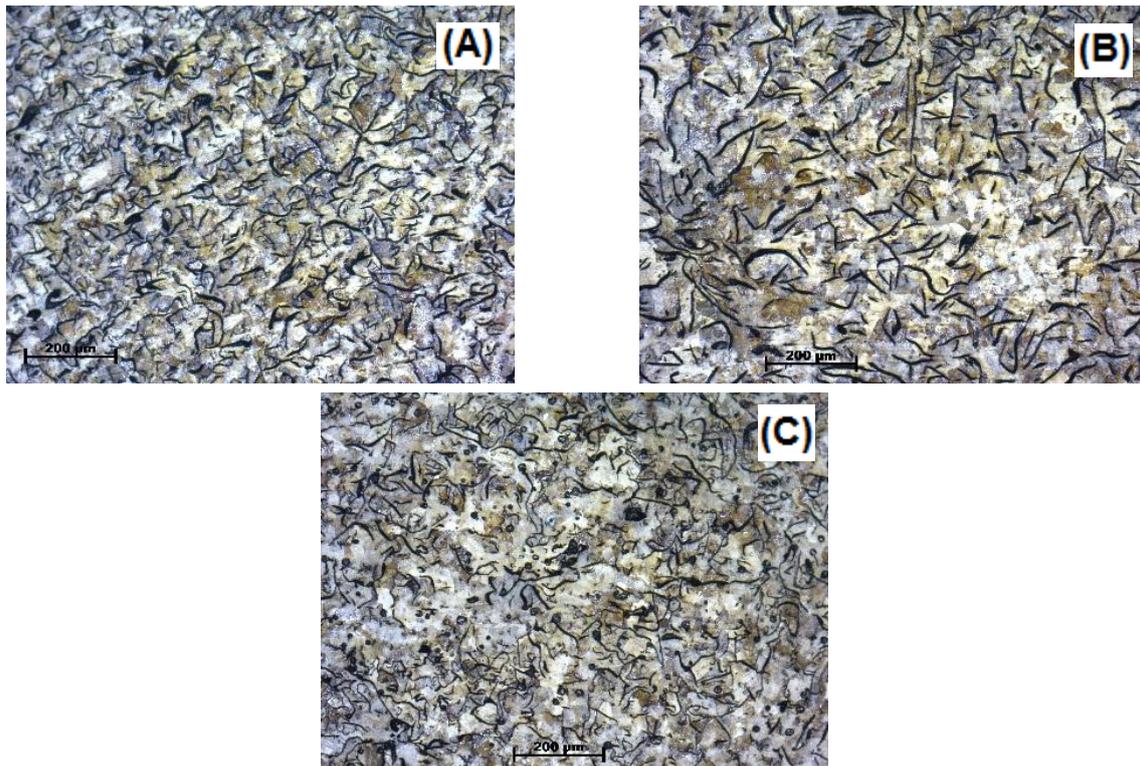


Figura 70 - Microestrutura da amostra 5, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

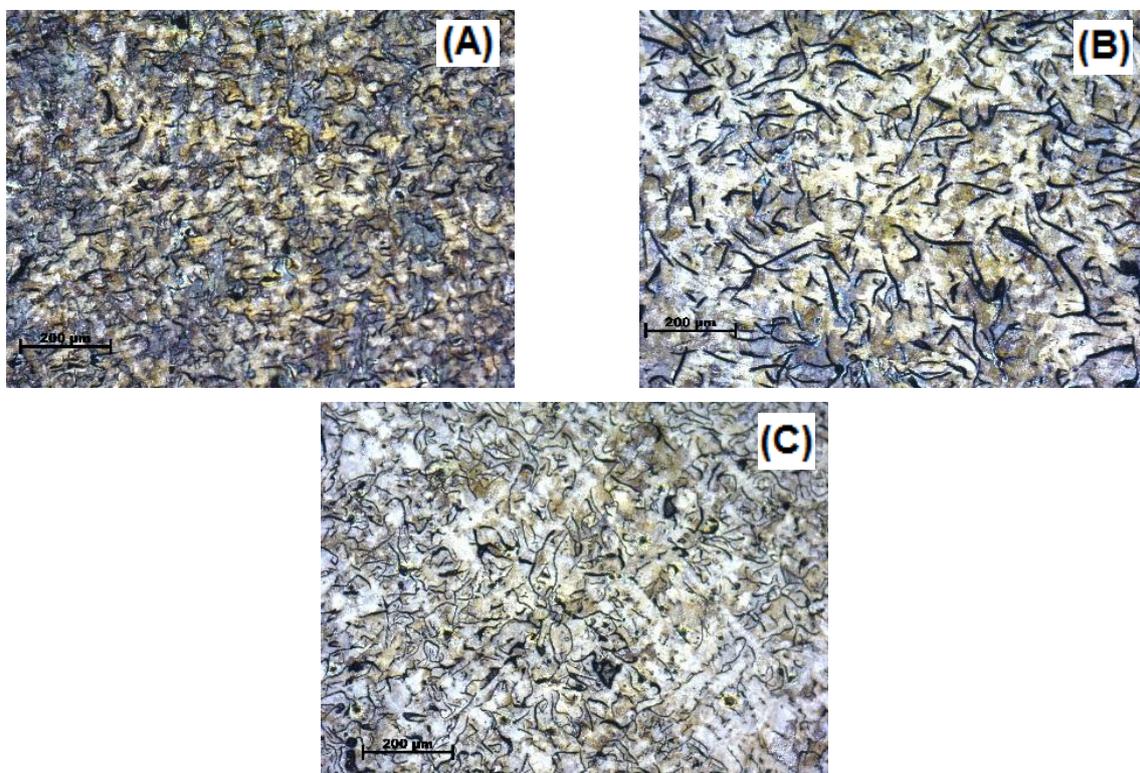


Figura 71 - Microestrutura da amostra 6, (A) canto interno, (B) centro, (C) canto externo
Fonte: Autoria própria

Por meio das imagens das microestruturas das amostras pode-se observar que, em todas as amostras, tanto do disco novo quanto do usado, obteve-se veios de grafita de maior dimensão na região central, comparados aos observados nos cantos, interno e externo, indicando que esta região sofreu um resfriamento mais lento durante o processo de fundição, permitindo o crescimento das grafitas. Também foi possível observar a presença de veios com orientação aleatória, encurvados e às vezes bifurcados na maioria das amostras, cerca de 75%, indicando grafita do tipo A, sendo o restante das grafitas composto pelo tipo B, D e E, porém esses outros tipos em menor porcentagem.

Utilizando-se um aumento de 1000x (escala de 20 μm), após ataque químico, apenas a região central das amostras foi microfotografada, pelo fato desta região ser a de maior contato com as pastilhas de freio durante o funcionamento do sistema, sofrendo assim maior influência do desgaste e calor de frenagem.

Abaixo encontram-se as microfotografias do centro das amostras do disco novo e usado.

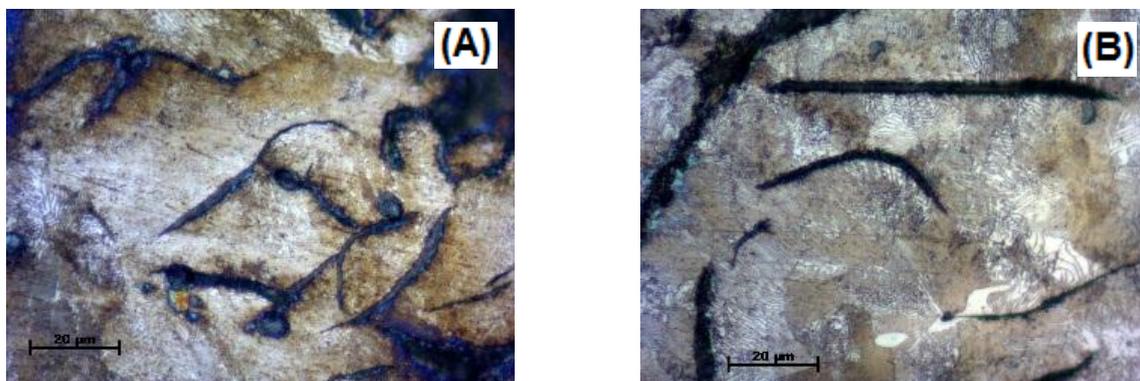


Figura 72 – Microestrutura da região central da amostra (A) 1N e (B) 2N
Fonte: Autoria própria

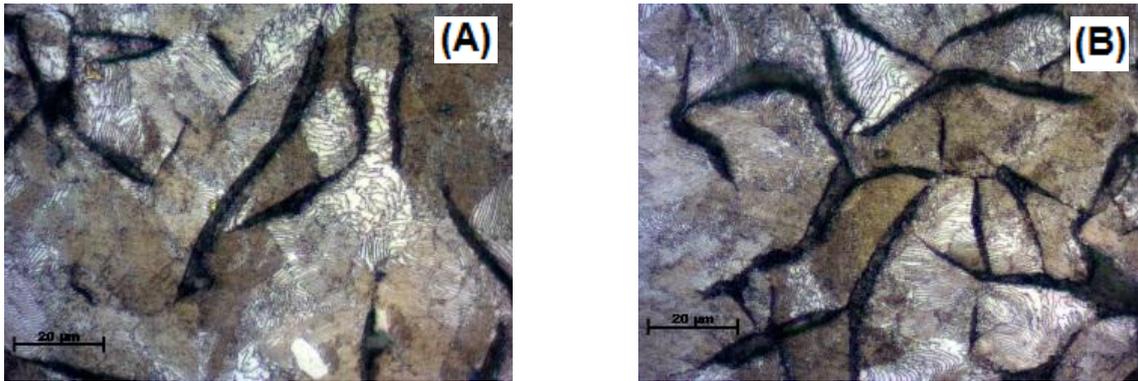


Figura 73 - Microestrutura da região central da amostra (A) 3N e (B) 4N
Fonte: Autoria própria

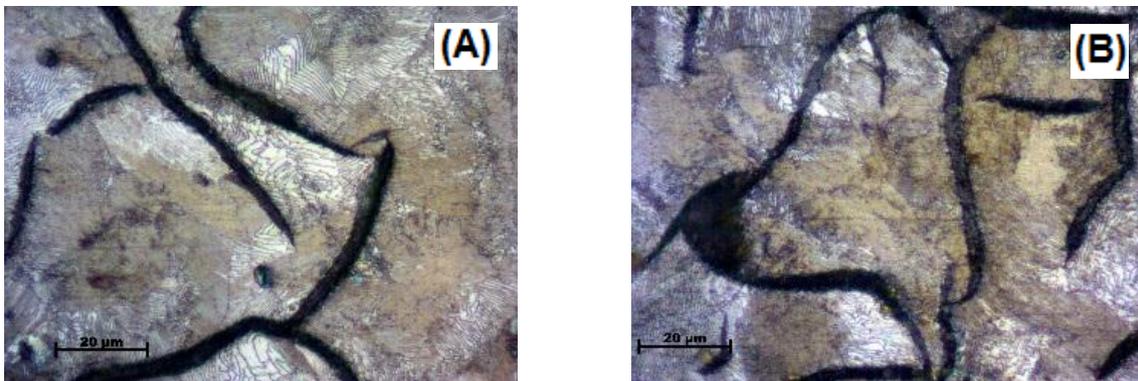


Figura 74 - Microestrutura da região central da amostra (A) 5N e (B) 6N
Fonte: Autoria própria

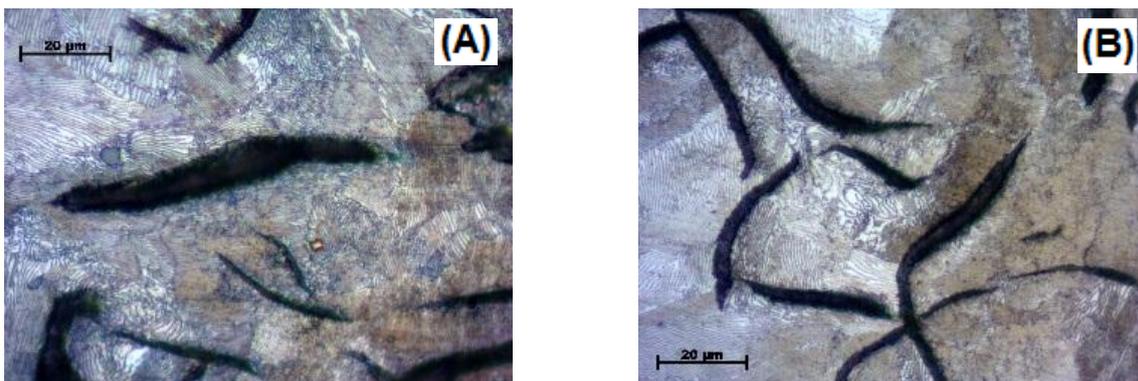


Figura 75 - Microestrutura da região central da amostra (A) 1 e (B) 2
Fonte: Autoria própria

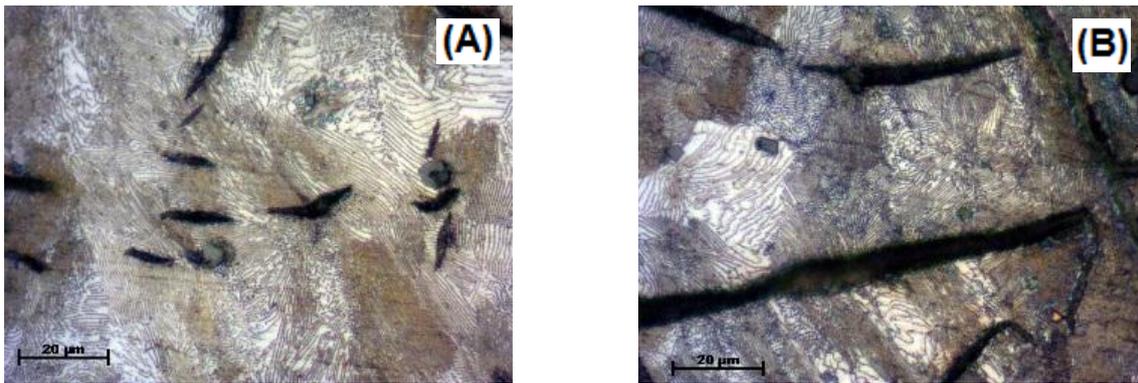


Figura 76 - Microestrutura da região central da amostra (A) 3 e (B) 4
Fonte: Autoria própria

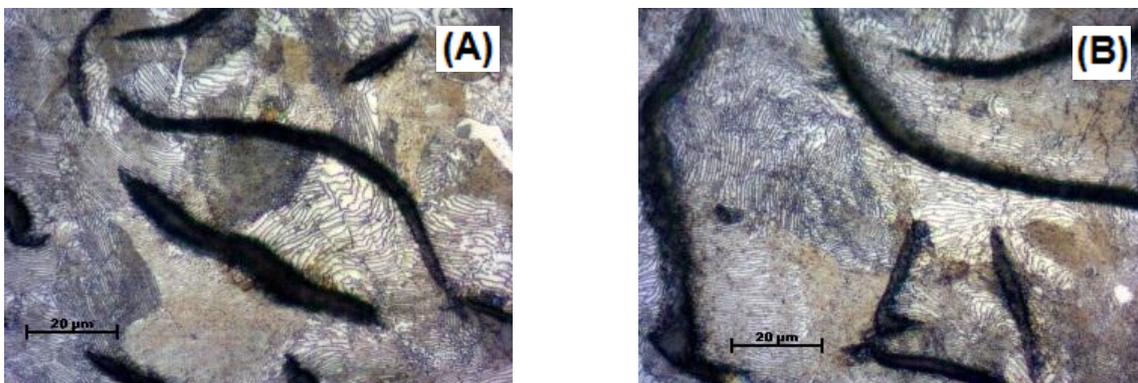


Figura 77 - Microestrutura da região central da amostra (A) 5 e (B) 6
Fonte: Autoria própria

Através das imagens acima observou-se que, todas as amostras são compostas por matriz perlítica, a qual consiste de camadas alternadas das fases ferrita (camadas claras) e cementita (camadas escuras).

Realizada a técnica para determinação do tamanho das grafitas presentes nas amostras, foram calculados os tamanhos de três grafitas por amostra, sendo posteriormente calculada a média desses valores, com seus respectivos desvios padrão, cujos resultados se encontram nas Tabelas 7 e 8 a seguir.

Tabela 7 - Média dos tamanhos das grafitas selecionadas do disco usado

Amostra	Média dos tamanhos (μm)	Desvio Padrão (μm)
1	44,4	29,3
2	35,6	6,7
3	18,0	4,2
4	63,5	36,8
5	60,8	34,3
6	48,6	26,7

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 - Média dos tamanhos das grafitas selecionadas do disco novo

Amostra	Média dos tamanhos (μm)	Desvio Padrão(μm)
1N	38,8	16,1
2N	51,8	27,7
3N	41,4	30,1
4N	42,8	10,3
5N	36,8	15,7
6N	40,9	20,4

Fonte: Autoria própria

De acordo com os resultados indicados nas Tabelas 7 e 8 pode-se determinar que, as amostras 4 e 5 do disco usado e, 2N e 4N do disco novo, são as regiões de posicionamento do massalote¹³ e do canal de alimentação no processo de fundição dos discos, pelo fato da grafita dessas regiões apresentar maior dimensão em relação as outras amostras, já que são regiões com resfriamento mais lento, permitindo que o carbono ainda no estado líquido se agregue aos veios de grafita e proporcione o aumento destes.

O desvio padrão para cada disco também foi calculado, e os resultados obtidos se encontram na Tabela 9.

¹³ Reserva de metal para compensar a contração do material líquido durante seu resfriamento.

Tabela 9 - Resultado dos desvios padrão dos discos

Disco	Desvio padrão(μm)
Usado	16,9
Novo	5,2

Fonte: A autoria própria

Com os valores das Tabelas 7 e 8 pode-se calcular a média das médias dos tamanhos das grafitas, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 - Média das médias dos tamanhos das grafitas de ambos os discos

Disco	Média das médias dos tamanhos (μm)
Usado	45,2
Novo	42,1

Fonte: A autoria própria

5 CONCLUSÃO

Por meio dos estudos realizados no presente trabalho pode-se verificar que, o tipo de grafita predominante nas amostras de ambos os discos é a grafita do tipo A, por meio da análise e comparação das microfotografias com a classificação feita pela norma ASTM A247, sendo este tipo de grafita o que proporciona o aumento das propriedades mecânicas de resistência dos discos.

Com base nas microfotografias da região central das amostras, com aumento de 1000x, concluiu-se que, a matriz é predominantemente perlítica, quantificando aproximadamente acima de 85% nas microfotografias do disco usado e acima de 70% no disco novo, proporcionando em ambos os discos maior resistência mecânica.

As microestruturas reveladas de ambos os discos não apresentaram muita diferença entre si, tendo ambas veios de grafita de maior tamanho no centro e sem mudança na morfologia destes, sendo apenas a média das médias dos tamanhos das grafitas no disco usado maior do que no disco novo, indicando que esta diferença possa ter sido causada pelo calor gerado durante o acionamento do sistema de frenagem, ou pelo processo de fundição do disco, ocasionando o aumento do dimensionamento das grafitas.

Como sugestão para trabalhos posteriores propõe-se, pesquisas a respeito da transferência de calor que ocorre entre os discos e as pastilhas de freio durante a frenagem, buscando uma maior eficiência do sistema, além do estudo das possíveis causas de trincas geradas nos discos de freio de ferro fundido cinzento.

REFERÊNCIAS

ANGELONI, M. **Fadiga isotérmica em ligas de ferro fundido cinzento para discos de freio automotivo**. 2005. 137f. Dissertação (Mestrado) - Interunidades, Física, Química e Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM A 247**:Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings. **ASTM International**, 2010. Disponível em: <<http://www.astm.org/Standard/standards-and-publications.html>>. Acesso em: 30 outubro 2015.

AUTOMOBILE brake rotor - LCA in product design. **Revista Training in Aluminium Application Technologies**, p. 1-31, 1994.

BERNHARDT, S. História do sistema de freio automotivo. **Revista eHow Brasil**, 2011. Disponível em: <http://www.ehow.com.br/historia-sistema-freio-automotivo-sobre_62593/>. Acesso em: 17 setembro 2015.

BORNHOLD, A. M. **Dimensionamento de um sistema de freio para veículo offroad de pequeno porte**. 2012. 46f. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade Horizontina. Horizontina, 2012.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CARDOSO, A. V. **Ciência dos Materiais Multimídia**, 2005. Disponível em: <www.cienciadosmateriais.org>. Acesso em: 2 outubro 2015.

CROLLA, D. A. **Automotive Engineering - Powertrain, chassis system and vehicle body**. 1ª. ed. Oxford: Elsevier Inc., 2009.

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. 2003. 6p. (A)

CUEVA, G.; TSCHIPTSCHIN, A. P.; SINATORA, A.; GUESSER, W. L. Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors. **Revista Elsevier**, São Paulo. Disponível em:
<http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=895969998&_sort=r&_st=13&view=c&md5=5b8f5d842e5f2f3462fa2e37eebba327&searchtype=a>. Acesso em: 28 outubro 2003. (B)

D'OLIVEIRA, A. S. Ferro Fundido. **LaMaTS**, 2007.

DIULGHEROGLO, P. A. **Demec**, 2007. 206f. Apostila. Disponível em:
<<http://ftp.demec.ufpr.br>>. Acesso em: 8 setembro 2015.

GONÇALVES, J. **Otimização de parâmetros de materiais de atrito de sistemas de freio usando algoritmos genéticos**. 2004. 197f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

GUESSER, W. L.; BAUMER, I.; TSCHIPTSCHIN, A. P.; CUEVA, G.; SINATORA, A. Ferros Fundidos Empregados para Discos e Tambores de Freio, Gramado, 2003. 6.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

JUNIOR, A. A. D. S. Freios e Embreagens por Atrito. **Universidade Estadual de Campinas**, Campinas, 2012.

MALUF, O.; ANGELONI, M.; MILAN, M. T.; SPINELLI, D.; FILHO, W. W. D. Development of materials for automotive disc brake. **Revista Pesquisa e Tecnologia - Minerva**. São Carlos, p. 149-158, 2006.

MARQUES, V. J. Sistema de freio; Princípio de funcionamento e componentes do sistema freio hidráulico automotivo. **Slide Share**, 2012. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/automobilisticafoz/sistema-de-freio-principio-de-funcionamento-componentes-e-sistemas-12291560>>. Acesso em: 28 outubro 2015.

MOREIRA, M. F. Ferros fundidos, 2005. 19f. Apostila. Disponível em: <<http://www.dalmolim.com.br/educacao/materiais/bibliomat/fofo.pdf>>. Acesso em: 29 outubro 2015.

OTT, S. M. **Efeito do molibdênio no comportamento em fadiga térmica de ferros fundidos vermiculares**. 1999. 101f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999.

TECNOLOGIA de aviões nos futuros freios dos carros. Jornal Paraná Online, Curitiba, 19 jan. 2013. Disponível em: <www.parana-online.com.br>. Acesso em: 8 outubro 2015.

PEIXOTO, F. D. M.; REBOUÇAS, E. S.; XAVIER, F. G. L.; FILHO, P. P. R. Desenvolvimento de um Software para cálculo da densidade de nódulos de grafita em ferro fundido nodular através de Processamento Digital de Imagens. **Revista Matéria**, Maracanaú, v. 20, p. 262-272, 2015.

PEREIRA, A. A.; BOEHS, L.; GUESSER, W. L. O Efeito das Característica das Inclusões de Sulfeto de Manganês na Usinabilidade. In: 15° POSMEC - SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 2005, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: FEMEC/UFU, 2005. p. 1-9.

PLESHA, M. E. **Mecânica para engenharia**: estática. Porto Alegre: Bookman Companhia Editora LTDA, 2014.

SERBINO, E. M. **Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar**. 2005. 111f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

SOARES, M. Forças de Atrito I-20. **MSPC - Informações Técnicas**, 2007. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/mecn/fric_120.shtml>. Acesso em: 3 novembro 2015.

Ataque químico das amostras do disco usado									
Análise microscópica após ataque químico									
Estudo dos resultados									
Elaboração do TCC2									
Entrega para revisão do TCC2									
Apresentação do TCC2									

Quadro 1 - Cronograma referente ao trabalho de conclusão de curso 1 e 2

