



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Vitor Ferraço Marino

Coeficiente de conformação superficial de armaduras em concreto sustentável –
Escória de aciaria

Ouro Preto
2016

Vitor Ferraço Marino

*Coeficiente de conformação superficial de armaduras em concreto sustentável –
Escória de aciaria*

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto

Ouro Preto
2016

M339c

Marino, Vitor Ferraço.

Coeficiente de conformação superficial de armaduras em concreto sustentável [manuscrito] : escória de aciaria / Vitor Ferraço Marino. – 2016.

62f.: il., color., graf., tab.

Orientadores: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Área de concentração: Engenharia Civil.

1. Engenharia civil. 2. Agregados (Materiais de construção) – Aciaria. 3. Concreto armado. 4. Aço-concreto - Aderências. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

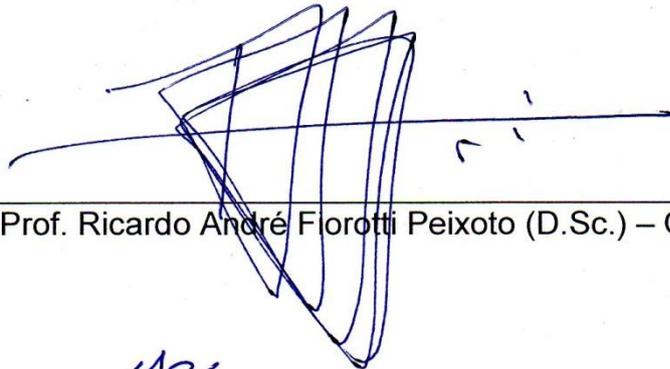
CDU:624

Fonte de catalogação: bibem@sisbin.ufop.br

Vitor Ferraço Marino

Coeficiente de conformação superficial de armaduras em concreto sustentável – Escória de aciaria

Monografia de conclusão de curso para obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto, defendida e aprovada em 13 de Abril de 2016, pela banca examinadora constituída pelos professores:



Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto (D.Sc.) – Orientador – UFOP



Prof. Guilherme Jorge Brigolini Silva (D.Sc.) – UFOP



Bárbara Ponciano de Souza (M.Sc)

Dedico este trabalho aos meus pais, a minha irmã e a toda minha família.

Agradecimento

Agradeço a Deus por sempre guiar meu caminho, aos meus pais pelo apoio, amor e torcida. Ao professor Ricardo Fiorotti pela orientação e por me ensinar acreditar em minha capacidade. Ao grupo Reciclos por contribuir para que a realização deste projeto fosse possível, em especial a Bárbara, Junio e Rodrigo.

Resumo

Este trabalho propõe estudar a viabilidade da utilização de agregados artificiais (escória de aciaria) no concreto armado. Os agregados artificiais foram caracterizados para determinação de suas propriedades físicas e químicas de acordo com a normatização da ABNT. Foram produzidas peças de concreto armado a partir da substituição total dos agregados convencionais por agregados obtidos do pós-processamento das escórias de aciaria e peças de concreto armado com agregados convencionais com objetivo de comparação. Os elementos foram produzidos a partir de uma dosagem para obtenção de resistência à compressão de 20 MPa e 40 MPa. Esses elementos foram submetidos à ensaios de resistência à tração na flexão e em seguida, foi determinado o coeficiente de conformação superficial dos elementos.

Palavras chave: escoria de aciaria, coeficiente de conformação superficial, concreto sustentável, concreto armado, agregados convencionais, agregados artificiais, aderência aço-concreto.

Abstract

This work proposes to study the feasibility of using artificial aggregates (steel slag) in reinforced concrete. Artificial aggregates were characterized to determine the physical and chemical properties according to the standardization of ABNT. Reinforced concrete parts were produced from the total replacement of conventional aggregates obtained by post-processing of steel slag and pieces of concrete with conventional aggregates for comparison purposes. The elements were produced from a dosage to obtain a compressive strength of 20 MPa and 40 MPa. These elements were submitted to the tensile strength tests in flexion and then will determine the surface conformation coefficient of the elements.

Key words: steel slag, surface conformation coefficient, sustainable concrete, reinforced concrete, conventional aggregates, artificial aggregates, adhesion steel-concrete.

Lista de Ilustração

Figura 3.1: Processo de produção do aço. (Fonte: Instituto Aço Brasil)	15
Figura 3.2: Tensões em um prisma fissurado carregado axialmente. (FONTE: Macgregor, 1992 <i>apud</i> COSTA, 2012).....	19
Figura 4.1: Ensaio de teor metálico.....	24
Figura 4.2: Forma utilizada na concretagem dos tirantes.	31
Figura 5.1: Teor metálico das escórias	33
Figura 5.2: Curva granulométrica dos agregados miúdos.....	34
Figura 5.3: Curva granulométrica dos agregados miúdos.....	34
Figura 5.4: Teor de umidade dos agregados	35
Figura 5.5: Material pulverulento dos agregados miúdos e graúdos.....	36
Figura 5.6: Massa específica dos agregados.....	37
Figura 5.7: Absorção de água	37
Figura 5.8: Massa unitária dos agregados	38
Figura 5.9: Leitura do ângulo de inclinação das nervuras	39
Figura 5.10: Valor médio da inclinação das nervuras	39
Figura 5.11: Inclinação das nervuras. (FRANÇA, 2004)	39
Figura 5.12: Medição do ponto mais baixo da altura das nervuras.....	40
Figura 5.13: Medição do ponto mais alto da altura das nervuras.....	41
Figura 5.14: Valores médios das alturas das nervuras	41
Figura 5.15: Distância entre as nervuras	42
Figura 5.16: Gráfico com a distância média entre as fissuras e os limites de norma.....	42
Figura 5.17: Altura e distância média das nervuras. (FRANÇA, 2004)	43
Figura 5.18: Tensões médias de escoamento das barras de aço CA-50.....	43
Figura 5.19: Tensões máximas das barras de aço CA-50	44
Figura 5.20: Gráfico com os resultados de alongamento das barras de aço CA-50.....	45
Figura 5.21: Gráfico com os resultados da massa linear e os limites máximos e mínimos, segundo NBR 7480 (2007).....	46
Figura 5.22: Massa específica do concreto produzido com escória (EA) e agregados naturais, no estado fresco.	48
Figura 5.23: Resultados do teor de ar incorporado nos concretos com escória (EA) e concretos com agregados naturais (NAT).....	49
Figura 5.24: Massa específica seca, saturada e real dos concretos no estado endurecido.	49
Figura 5.25: Resultados do índice de vazios e absorção de água	50
Figura 5.26: Valores de resistência à compressão dos concretos com escória e com agregados naturais.....	51
Figura 5.27: Valores de tração diametral dos concretos com escória e com agregados naturais	51

Figura 5.28: Ensaio para determinação do coeficiente de conformação superficial de um tirante de concreto armado.	52
Figura 5.29: Distâncias médias entre as fissuras nos tirantes de concreto com barras de aço de 8,0 mm	53
Figura 5.30: Distâncias médias entre as fissuras nos tirantes de concreto com barras de aço de 10,0 mm	53
Figura 5.31: Distâncias médias entre as fissuras nos tirantes de concreto com barras de aço de 12,5 mm	54
Figura 5.32: Número de fissuras nos tirantes ensaiados	54
Figura 5.33: Fissuração em tirantes de concreto com escória de 20 MPa.....	55
Figura 5.34: Fissuração em tirantes de concreto natural de 20 MPa	55
Figura 5.35: Coeficiente de conformação superficial das barras estudadas	56
Figura 5.36: Coeficiente de conformação superficial para os tirantes de concretos com resíduos borracha analisados por França (2004).....	56

Sumário

1.	Introdução.....	11
2.	Objetivos.....	12
3.	Revisão Bibliográfica.....	13
3.1.	Impactos gerados pela construção civil	13
3.2.	Produção de aço no Brasil.....	13
3.3.	Escória de aciaria	15
3.4.	Importância da reciclagem.....	17
3.5.	Concreto armado	18
4.	Materiais e Métodos.....	22
4.1.	Materiais	22
4.1.1.	Agregados artificiais	22
4.1.2.	Agregados naturais	22
4.1.3.	Cimento.....	22
4.1.4.	Barras de aço	22
4.2.	Métodos.....	23
4.2.1.	Processamento das escórias	23
4.2.2.	Caracterização dos agregados	24
4.2.3.	Caracterização das barras de aço	28
4.2.4.	Dosagem do concreto	29
4.2.5.	Caracterização do concreto	30
4.2.6.	Determinação do coeficiente de conformação superficial	30
5.	Resultados.....	33
5.1.	Teor metálico	33
5.2.	Granulometria.....	33
5.3.	Teor de umidade.....	35
5.4.	Material pulverulento	36
5.5.	Massa específica.....	36
5.6.	Absorção de água.....	37
5.7.	Massa unitária	38
5.8.	Caracterização das barras de aço	38
5.8.1.	Inclinação das nervuras	38
5.8.2.	Altura das nervuras	40

5.8.3.	Distância entre as nervuras.....	41
5.8.4.	Tensão de escoamento.....	43
5.8.5.	Alongamento e Massa linear.....	44
5.9.	Dosagem do concreto.....	47
5.10.	Caracterização do concreto.....	48
5.10.1.	Estado fresco	48
5.10.2.	Estado endurecido	49
5.11.	Coefficiente de conformação superficial	52
6.	Conclusões.....	58
	Referências.....	60

1. Introdução

A preservação do meio ambiente, o uso sustentável de recursos naturais, a conscientização da sociedade em relação às questões ambientais e as pressões formais por parte das legislações ambientais têm levado as indústrias a buscar um melhor desempenho nessa área.

A construção civil é um dos setores que provoca maior impacto ambiental, devido ao elevado consumo de matéria-prima. De acordo com SJOSTROM (*apud* John 2000), o consumo de recursos naturais chega entre 14% a 50% na construção civil. Segundo estimativa feita por John (2000), no Brasil, a utilização de agregado para concreto e argamassa, é em torno de 210 milhões de toneladas por ano.

A principal fonte de degradação ambiental é a geração de resíduos. Resíduos são todos os produtos gerados dentro do processo de produção ou consumo de outro produto, independente do seu valor comercial (JOHN, 1996).

Dentro desse contexto, a indústria siderúrgica e da construção civil ocupam destaque. A primeira por gerar em torno de 600 kg de resíduos por tonelada de aço produzido (IABr, 2014). Parte destes resíduos é constituída pela escória de aciaria que é obtida da etapa de refino do ferro gusa que posteriormente será transformado em aço. E a indústria da construção civil, que tem elevado consumo de recursos naturais para a produção de concretos e argamassas fazendo com que esses recursos se tornem cada vez mais escassos.

Desta forma, este trabalho propõe estudar a viabilidade técnica de se produzir elementos em concreto armado com barras de aço tipo CA em concretos produzidos com escoria de aciaria como agregados de forma a substituir os agregados naturais usualmente utilizados na construção civil, através da análise da determinação do coeficiente de conformação superficial.

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

Avaliar o coeficiente de conformação superficial (CCS) de barras de aço tipo CA, quando aplicados em concretos produzidos com agregados naturais (CAN) e em concretos produzidos com escória de aciaria (CEA).

2.2. Objetivos específicos

- Dimensionar misturas produzidas a partir da reciclagem do resíduo sólido de siderurgia (CEA), para aplicação a obras correntes de engenharia;
- Construir modelos para determinação do coeficiente de conformação superficial – tirantes, para traços C20 e C40 – para concretos produzidos com agregados naturais e concretos produzidos com escória de aciaria;
- Caracterizar mecanicamente modelos de coeficiente de conformação superficial, submetidos a carregamentos axiais de tração, para barras de aço CA 50 com diâmetros 8,0 mm; 10,0 mm e 12,5 mm;
- Gerar informações referentes à aplicabilidade de matérias primas oriundas de processos de reciclagem de resíduos sólidos de siderurgia aos processos de fabricação de produtos de base tecnológica, aplicados à construção civil.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Impactos gerados pela construção civil

A construção civil é uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento econômico e social, pois está diretamente ligada a geração de emprego e renda. No entanto, está atrelada a uma grande geração de impactos ambientais: produção de grandes volumes de resíduos, o elevado consumo de recursos naturais e pela constante transformação das paisagens.

A utilização de agregados naturais está entre um dos maiores impactos ambientais gerados pela construção civil, já que a extração destes demanda custos muito altos de energia, degradação de rios, poluição sonora e do meio ambiente. Além disso, apesar de existirem muitas reservas minerais de areia e brita esses recursos não são renováveis e aliado a isso, a exploração dessas reservas param em obstáculos como grandes distância de transporte e legislações ambientais muito rigorosas.

Segundo IBRAM (2012), houve um aumento de 6% no consumo per capita brasileiro de agregados por habitante/ano. Evoluiu de 3,3 toneladas de agregados por habitante/ano em 2010 para 3,5 t/hab. em 2011.

A importância dos agregados para construção civil, segundo IBRAM (2012):

- Para cada km de uma linha do metrô são consumidos 50.000 toneladas de agregados;
- A construção de cada km de estrada pavimentada consome cerca de 9.800 toneladas;
- Em casas populares de 50 m² são consumidas 68 t;
- Em edifícios são consumidos 1.360 t para cada 1.000 m².

3.2. Produção de aço no Brasil

O Brasil possui atualmente 29 usinas siderúrgicas, pertencentes a 11 grupos empresariais. Dez estados integram o parque produtor nacional, embora a região sudeste tenha a maior parte da produção, com 22 usinas. Em 2013, o Brasil teve participação de 2,2% na produção global, ocupando a nona posição no ranking mundial no setor. E de 52,2% na América Latina. (IABr 2013)

Em 2013, a geração de resíduos na indústria siderúrgica foi de 17,7 milhões de toneladas, uma média de 600kg por tonelada de aço produzida, sendo 6,5% deste volume não reaproveitado e armazenado em pátios. (IABr 2013)

As matérias-primas utilizadas para fabricação do aço são basicamente o minério de ferro e o carbono, que é usado na indústria siderúrgica como carvão mineral e vegetal. O carbono tem como objetivo servir de combustível para elevar a temperatura no alto-forno e também para redução do minério de ferro, associando-se ao oxigênio que é desprendido do minério a altas temperaturas. Nessa primeira etapa o minério é transformado em pelotas e o carvão em coque.

Na etapa seguinte, redução, essas matérias-primas são carregadas para o alto forno onde o ferro passa a ser conhecido como ferro gusa após sua liquefação. O gusa é uma liga de ferro e carbono com um teor de carbono muito elevado.

A terceira etapa é conhecida como refino. O ferro gusa e a sucata de ferro e aço são transportados para aciarias elétricas e a oxigênio para serem transformados em aço líquido. Nessa etapa parte do carbono contido no gusa será eliminado assim como impurezas. O aço líquido é solidificado em equipamentos de lingotamento contínuo para produzir semi-acabados, lingotes e blocos. A figura 3.1 ilustra todo esse processo.

E na etapa de laminação, os semi-acabados, lingotes e blocos passam por laminadores para formar o produto final.

A indústria siderúrgica produz enormes quantidades de resíduos. De acordo com Silveira et al. (2004 *apud* SOUZA, 2007), a média brasileira de geração é de 700 kg/t de aço bruto produzido.

Benquerer (2000 *apud* SOUZA, 2007) informa que o alto forno é capaz de gerar em torno de 49% do total dos resíduos produzidos numa usina siderúrgica e as aciarias contribuem com 26%.

PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO

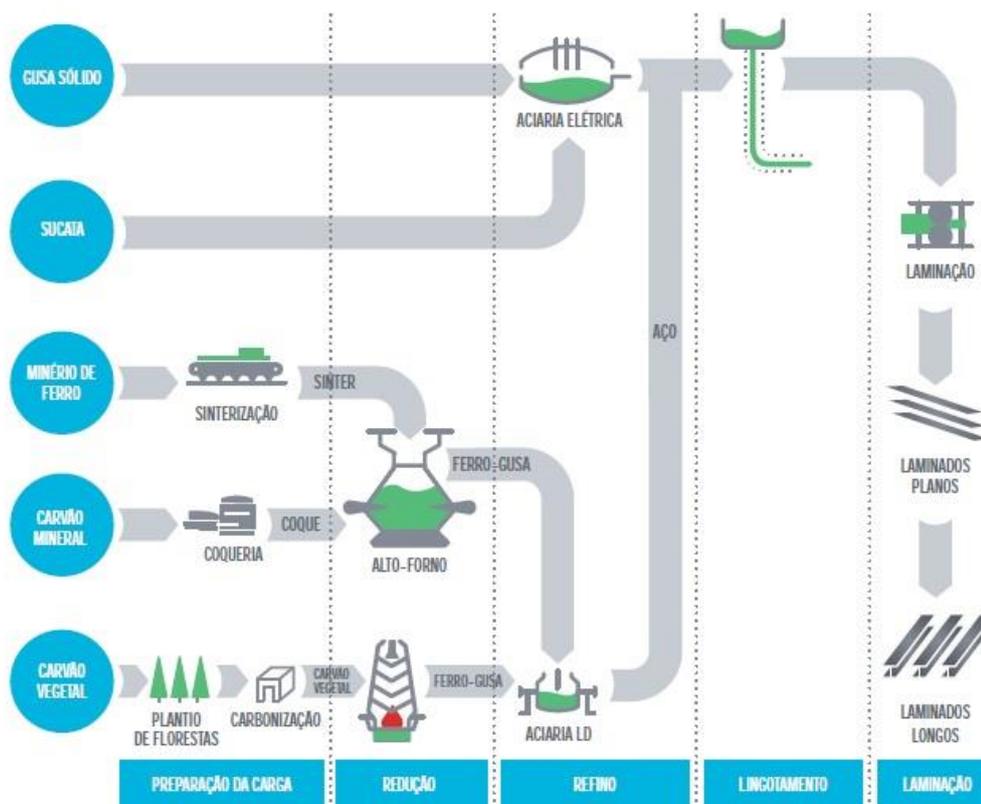


Figura 3.1: Processo de produção do aço. (Fonte: Instituto Aço Brasil)

3.3. Escória de aciaria

A escória de aciaria é um resíduo que é gerado durante o processo de refino do gusa dentro dos fornos de elaboração do aço.

O ferro gusa proveniente da etapa de redução, do alto forno, é enviado aos conversores LD (iniciais das cidades austríacas Linz e Donawitz). Neles o oxigênio de alta pureza queima o carbono e o silício presentes no gusa líquido, gerando uma elevação da temperatura. A escória é formada pela adição de fundentes e de CaO , CaO.MgO e CaF_2 . Ela é responsável pela remoção das impurezas presentes na massa líquida. Por fim são adicionados os ferros-liga com o objetivo de atingir determinadas características no produto final.

A escória ao ser retirada do conversor é resfriada ao ar livre para sua solidificação. Ela é submetida a uma separação magnética, já que ainda carrega consigo uma quantidade de material metálico, possibilitando seu posterior aproveitamento no próprio conversor.

As escórias podem assumir variações consideráveis de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas de acordo com o tipo de aciaria, do controle do processo de fabricação do aço, dos procedimentos de processamento da escória após resfriamento e de sua estocagem. Por isso, para utilização desse material, deve-se levar em conta a origem do mesmo e as variáveis de processo na aciaria.

Composição química das escórias

A tabela 3.1 abaixo apresenta a composição química típica dos diversos tipos de escória:

Tabela 3-1: Composição química das escórias

	CaO	Al₂O₃	SiO₂	MgO	FeO	MnO	S
Alto-forno	40%	10%	35%	7%	1%	1%	1%
Aciaria LD	40%	5%	10%	5%	25%	4%	0,1%
Aciaria elétrica	30%	5%	10%	7%	40%	4%	0,1%
Forno panela	50%	30%	5%	7%	1%	1%	0,3%

Fonte: Belgo Grupo Arcelor (2006)

Expansibilidade das escórias

Segundo Motz (2000 *apud* SOUZA, 2007), a utilização de escórias de aciaria na construção civil está diretamente relacionada com o controle dos componentes CaO e MgO, pois são estes que determinam ou não a estabilidade volumétrica da escória. Portanto, quanto mais altos forem esses teores, maior a instabilidade volumétrica da escória. O fenômeno de instabilidade da escória é explicado pela hidratação dos referidos óxidos. O CaO hidrata-se rapidamente, causando mudanças de volume em curto prazo (semanas), enquanto o MgO hidrata-se mais lentamente, podendo levar anos para se desenvolver. A expansão volumétrica provoca desintegração dos agregados da escória e conseqüentemente perda de resistência.

Para impedir que a expansão das escórias ocorra, faz-se uma pré-hidratação do material denominada cura, que pode ser realizada a céu aberto submetendo-se o material ao contato com a água. Este processo tem duração média de três meses a um ano, a depender da composição química da escória (MACHADO, 2000).

Propriedades físicas

Proctor et al. (2002 *apud* SOUZA, 2007) afirmam que as partículas de escória de aciaria possuem a característica de se intertravarem por apresentarem uma forma acentuadamente angular e uma textura superficial grosseira. Além disso, a massa específica é mais elevada que a dos agregados naturais e um moderado índice de absorção de água. A tabela 3.2 mostra os valores especificados para propriedades físicas das escórias de aciaria.

Tabela 3-2: Valores de propriedades físicas das escórias de aciaria

Propriedade	Valor
Massa específica (g/cm ³)	3,0 – 3,5
Massa unitária (kg/dm ³)	1,6 – 1,7
Absorção de água (% em peso)	1% a 2%

Fonte: DNER, 1994.

3.4. Importância da reciclagem

Estudos capazes de detectar a potencialidade e a viabilidade da reciclagem dos resíduos industriais são encarados hoje como atividade que pode contribuir para produção de diversos produtos, redução dos custos, além de resultar em “novas” matérias primas para uma série de setores industriais. (SOUZA, 2007)

Além disso, a reciclagem é muito importante, pois tem o papel de diminuir o desperdício, reduzir a quantidade de resíduos, diminuir custos que são gerados pelas etapas de segregação, armazenamento, manuseio e transporte de rejeitos, aumentar os insumos, pois muitos materiais descartados podem ser utilizados como matéria prima de processos ou até mesmo serem reutilizados pela própria indústria que o descartou. Portanto, se a indústria conseguir reaproveitar ou até mesmo vender esses resíduos, estará criando uma maneira de conseguir uma fonte de renda extra e resolver o problema.

Assim como outras atividades industriais, o setor siderúrgico gera uma grande quantidade de resíduos industriais que para serem descartados apresentam inúmeros inconvenientes, tais como (GALDEANO et al, 1994 *apud* GEYER 2001):

- necessidade de grandes áreas para o descarte;

- elevado custo de transporte e preparação da área de descarte (US\$ 20 a US\$ 30 por tonelada de resíduo depositado);
- perda de materiais;
- agressão ao meio ambiente.

Dentro deste contexto, destaca-se a construção civil que possui, dentre os setores industriais, um grande potencial para o aproveitamento de resíduos. Isto se deve a uma série de fatores, tais como o elevado consumo de insumos e o déficit habitacional associado aos altos custos dos insumos básicos para o desenvolvimento de projetos habitacionais. Isto torna indispensável o desenvolvimento de materiais e/ou tecnologias alternativas. (GEYER, 2001)

3.5. Concreto armado

O concreto armado é um dos materiais mais consumidos pela indústria da construção civil. De acordo com Mehta e Monteiro (1994, *apud* COSTA, 2012), a grande utilização de concreto armado está relacionada à facilidade de execução, ao seu baixo custo, ao seu bom desempenho estrutural, e à diversidade de formas. O consumo mundial de concreto é da ordem de 5,5 bilhões de toneladas por ano.

O concreto armado é o material resultante da combinação do concreto e o aço, onde o concreto resiste à compressão e o aço resiste usualmente apenas à tração. Através da aderência, é possível que haja uma transferência de esforços entre os dois materiais. (COSTA, 2012)

Para que esses dois materiais trabalhem em harmonia necessita-se da aderência, segundo Kirchheim et al. (2005 *apud* COSTA, 2012), aderência é a resistência ao movimento ou ao deslizamento relativo entre a superfície da barra e o concreto ao seu redor. O concreto armado é caracterizado pela interação entre esses materiais e o bom desempenho desse mecanismo é garantido pela eficiente ligação entre o aço e o concreto.

É indispensável que para calcularem-se as deflexões, controle de fissuração, cálculo de ancoragens, emendas por transpasse, quantidade mínima de armadura e à durabilidade das estruturas que exista um comportamento solidário entre a barra de aço e o concreto. (DUCATTI, 1993 *apud* COSTA, 2012)

De acordo com Park e Paulay (1975 *apud* COSTA, 2012), mesmo após a ocorrência de fissuração o concreto armado tem a capacidade de resistir aos

esforços. Isso é garantido pela a aderência que garante que o aço e o concreto trabalhem de forma unificada.

Tensão de aderência

Segundo MacGregor (1992 *apud* COSTA, 2012), através de três modelos distintos: viga à flexão, prisma tracionado axialmente e, arrancamento, estuda-se a tensão de aderência nas peças de concreto armado.

Prismas tracionados axialmente

Em um prisma fissurado carregado axialmente, como ilustra a Figura 3.2, a tensão do aço entre duas fissuras é menor, a tensão no concreto nas fissuras é nula e, a tensão de aderência é nula, pois não há variação de tensão na armadura de um ponto de fissura em relação a outro, há variação da tensão apenas entre as fissuras. (COSTA, 2012)

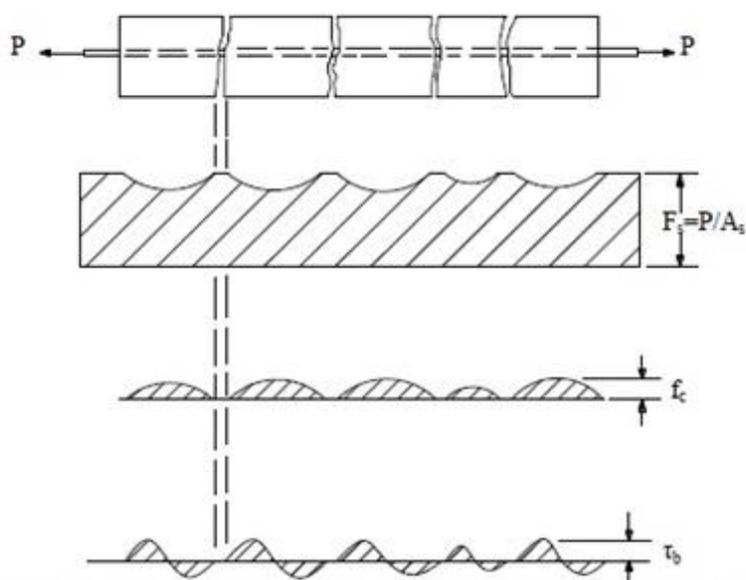


Figura 3.2: Tensões em um prisma fissurado carregado axialmente. (FONTE: Macgregor, 1992 *apud* COSTA, 2012)

Sendo:

P = força de tração;

A_s = área de aço;

F_s = tensão no aço;

F_c = tensão no concreto;

T_b = tensão de aderência

Modos de ruptura causados pela aderência

Segundo Dumêt (2003, *apud* COSTA, 2012) a ruptura por arrancamento e a ruptura por fendilhamento destacam-se dentre os diversos tipos de modos de ruptura causados pela perda de aderência. Estas são influenciadas por diversos fatores como, por exemplo, o tipo de armadura, a conformação superficial, o diâmetro da barra, a distância entre as barras, o cobrimento do concreto, a presença de armadura de confinamento, entre outros.

Ensaio de tirantes

O ensaio de tirantes reproduz satisfatoriamente as condições reais da parte tracionada das vigas. Podem ser utilizados tirantes prismáticos ou cilíndricos, como ilustra a Figura 3.3. (COSTA, 2012)

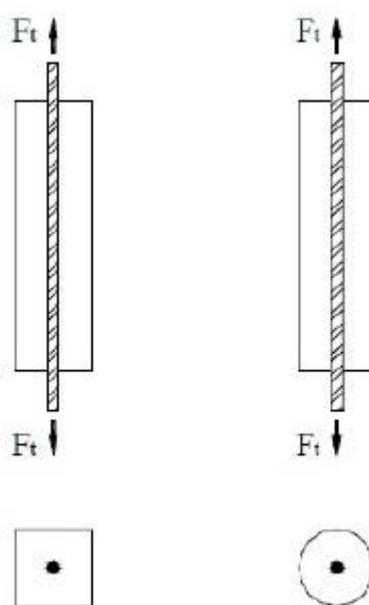


Figura 3.3: Modelos de corpos de prova de tirantes. (FONTE: Barbosa, 1998 *apud* COSTA, 2012)

O ensaio consiste em aplicar duas forças opostas de tração em cada extremidade da barra. Barbosa (1998 *apud* COSTA, 2012) verifica que o ensaio de tirante permite a visualização das fissuras pelo espaçamento mínimo, médio e máximo das mesmas ao longo do ensaio e, do total de fissuras que efetivamente são formadas.

A NBR 7477 (ABNT, 1982) define que deve ser utilizado tirante de seção transversal quadrada, com as características determinadas pela equação 1.1.

$$d = \sqrt{\pi\Phi \left(\frac{\Phi}{4} + 7 \right)} \quad \text{Equação (1.1)}$$

Onde:

d = lado do tirante.

Φ = diâmetro nominal da barra.

Os tirantes devem ser posicionados ao sistema de carregamento por meio das garras livres às extremidades das barras. A carga deve ser aplicada até atingir 80% da carga de escoamento da barra presente no ensaio. Após, mede-se as distâncias entre as fissuras, presentes nas quatro faces do tirante.

Devem ser ensaiados nove tirantes por diâmetro do aço, para calcular o coeficiente de conformação superficial apresentado na Equação 1.2.

$$\eta = \frac{2,25.d}{\Delta l_{\text{médio}}} \quad \text{Equação (1.2)}$$

Onde:

η = coeficiente de conformação superficial.

d = lado da seção do tirante.

$\Delta l_{\text{médio}}$ = média da distância média entre as fissuras, considerando as quatro faces dos nove tirantes, para cada diâmetro ensaiado.

4. Materiais e Métodos

4.1. Materiais

4.1.1. Agregados artificiais

Neste trabalho foi utilizado um tipo de escórias de aciaria, Linz-Donawitz (LD), proveniente de uma usina siderúrgica da região sudeste do Brasil.

4.1.2. Agregados naturais

Os agregados naturais (areia natural de rio e brita 0) foram utilizados para a produção de um concreto de referência para comparação com os resultados obtidos nos concretos produzidos com escória.

4.1.3. Cimento

Devido ao alto teor de óxido de cálcio presente nas escórias, que faz com que as reações de endurecimento sejam mais lentas, optou-se pela utilização do cimento CP V.

4.1.4. Barras de aço

As barras de aço que foram testadas quanto à aderência nos concretos produzidos são do tipo CA-50 nos diâmetros comumente utilizados na construção civil, com as características mostradas na Tabela 4.1:

Tabela 4-1: Características das barras de aço

Bitola (mm)	Massa nominal (kg/m)	Tolerância (%)	Seção nominal (mm²)
8,0	0,395	+/- 7	31,2
10,0	0,617	+/- 6	78,5
12,5	0,963	+/- 6	122,7

4.2. Métodos

4.2.1. Processamento das escórias

Segundo Souza (2015), análises preliminares da composição granulométrica e teor de metálicos de amostras da escória bruta foram realizados. Observou-se que a distribuição granulométrica da escória de aciaria bruta estava fora dos limites utilizáveis estabelecidos pela NBR 7211(2005). A pilha de escória com granulometria abaixo de 4,8 mm apresentava grandes quantidades de material retido nas peneiras de 2,36 e 1,18 mm. Por isso, foram construídas duas peneiras com dimensões de (1,00 x 2,0)m com malha de aberturas de 2,4 e 1,18mm. E assim, foi realizado o peneiramento manual da escória.

Em seguida, a escória de aciaria passou por um processo industrializado para recuperação da fração metálica ainda existente nas amostras brutas. Para verificação da eficiência do processo foi procedido o ensaio de teor metálico, que foi realizado de acordo com protocolo RECICLOS REC01/2011. O material utilizado na determinação do teor de metálicos foi seco em estufa, a 105°C até constância de massa e em seguida foi pesado (m_0). A amostra foi então circulada pelo dispositivo de recuperação de metálico. O material retido no imã, que é a fração metálica da amostra foi completamente removido do imã e determinado seu peso (m_i). O processo de circulação da amostra repetiu-se até que a fração metálica retida no imã fosse inferior a 1,0% da massa da amostra inicial.

O teor metálico é calculado pela equação 2.1:

$$T_{met} = \frac{m_0 - \sum m_i}{m_0} \times 100 \quad (\text{equação 2.1})$$

T_{met} = teor de metálicos, em %

m_0 = massa inicial da amostra, em g

$\sum m_i$ = somatório da massa retida no imã em cada passada, em g.

Com intuito de acelerar as reações de expansão decorrentes da instabilidade volumétrica da hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio (CaO e MgO), as escórias foram armazenadas em bombonas com água para serem curadas por um

período de 3 meses, ao final deste período foram determinadas as porcentagens de CaO livre, pelo método do etilenoglicol.



Figura 4.1: Ensaio de teor metálico

4.2.2. Caracterização dos agregados

Os materiais utilizados como agregados na produção dos concretos foram submetidos á ensaio de caracterização de suas propriedades físicas, químicas e ambientais sendo todos os ensaios conduzidos de acordo com a normatização brasileira.

4.2.2.1. Análise granulométrica

A distribuição granulométrica, bem como a dimensão máxima característica e módulo de finura das amostras de material natural e artificial, foram realizadas de acordo com a NBR 248/2003.

As mostras foram preparadas por quarteamento e secagem em estufa até a constância de massa, a massa das amostras foi determinada com resolução de 0,1g e a amostra foi colocada no conjunto de peneiras da série normal como mostra a

tabela 4.2. Após a vibração mecânica do conjunto de peneiras foi avaliada a massa de material retida em cada peneira.

Tabela 4.2: Distribuição de peneiras série normal e intermediária

Série Normal	Série Intermediária
76 mm	-
-	64 mm
-	50 mm
38 mm	-
-	32 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,8 mm	-
2,4 mm	-
1,2 mm	-
0,6 mm	-
0,3 mm	-
0,15 mm	-

A partir da execução do ensaio foram determinados a dimensão máxima característica e o módulo de finura de cada material, sendo a dimensão máxima característica correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa e o módulo de finura a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

4.2.2.2. Teor de umidade

O teor de umidade dos agregados utilizados foi determinado por meio do procedimento estabelecido pela NBR 9939/2011.

As amostras de ensaio coletadas de acordo com a NM 26 (2009) e NM 27 (2001) tiveram a massa úmida (M_i) determinada, então as amostras foram deixadas em

estufa até constância de massa e após seu resfriamento foi obtida a massa seca da amostra.

O teor de umidade total é dado pela equação 2.2:

$$h = \frac{M_i - M_f}{M_f} \times 100 \quad (2.2)$$

onde:

h = teor de umidade total em %

M_i = massa inicial da amostra, em g

M_f = massa final da amostra, em g

4.2.2.3. Material pulverulento

O teor de material fino que passa pela peneira de 75 µm foi determinada através da NBR NM 46/2003.

Para a realização deste ensaio o material deve ser previamente seco em estufa, após a secagem obteve-se a massa da amostra. Em seguida a amostra é coberta com água e agitada para que ocorra a separação das partículas menores que 75µm das maiores, posteriormente verte-se a água sobre um conjunto de peneiras entre 75µm e 1,18mm para que não ocorra perda de material, adiciona-se então uma segunda quantidade de água e repete-se o processo até que a água de lavagem fique clara. A amostra é então seca em estufa até constância de massa e é pesada novamente.

A quantidade de material que passa pela peneira de abertura 75µm por lavagem é dada pela equação 2.3:

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (2.3)$$

Onde:

m = porcentagem de material mais fino que a peneira de 75µm por lavagem.

m_i = massa original da amostra seca, em g.

m_f = massa seca após a lavagem, em g.

4.2.2.4. Massa específica

A massa específica foi determinada de acordo com a NBR NM 52/2009 para as amostras de agregado miúdo.

Para os agregados graúdos a massa específica foi obtida nas condições seca e saturada, segundo NBR NM 53/2009. Para a realização deste ensaio, o material passante na peneira com abertura de 4,75mm é eliminado e o agregado graúdo (material retido na peneira 4,75mm) deve ser lavado e em seguida seco em estufa até a constância de massa. Após o resfriamento, a amostra é pesada e em seguida é submersa em água por 24 horas, a amostra foi então seca superficialmente e determinou-se a massa do agregado no estado saturado superfície seca, logo depois se procedeu a pesagem hidrostática da amostra determinando-se assim a massa submersa. Por fim, o material é seco em estufa para a determinação da massa seca.

A massa específica do agregado seco é dada pela equação 2.4:

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (2.4)$$

onde:

d = massa específica do agregado seco, em g/cm³.

m = massa ao ar da amostra seca, em g.

m_s = massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em g.

m_a = massa em água da amostra, em g.

A massa específica do agregado na condição saturado superfície seca e dada pela equação 2.5:

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (2.5)$$

onde:

d_s = massa específica do agregado na condição saturado superfície seca, em g/cm³

m_s = massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em g.

m_a = massa em água da amostra, em g.

A absorção de água do agregado graúdo também é obtida pelo método de ensaio na NBR NM 53/2009 e é dada pela equação 2.6:

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (2.6)$$

onde:

A = absorção de água, em %.

m_s = massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em g.

m = massa da amostra seca, em g.

4.2.2.5. Massa unitária

A determinação da massa unitária e índice de vazios dos agregados foram realizados conforme a NBR NM 45/2006.

Para a obtenção da massa unitária dos agregados pesou-se o recipiente padrão e de volume conhecido, então 1/3 da amostra foi colocado neste recipiente e houve a compactação desta camada com 25 golpes com a haste padronizada, esse procedimento foi realizado para mais duas camadas. Por fim a última camada foi nivelada e o recipiente contendo a amostra foi pesado.

A massa unitária do agregado é calculada pela equação 2.7:

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \quad (2.7)$$

onde:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado, em kg/m³

m_{ar} = massa do recipiente mais o agregado, em kg

m_r = massa do recipiente vazio, em kg

V = volume do recipiente, em m³

4.2.3. Caracterização das barras de aço

As barras de aço foram submetidas a ensaios para determinação de suas características físicas como diâmetro, comprimento, espaçamento e altura das

nervuras, por meio da NBR 7480/2007. As barras também foram ensaiadas em relação à tração à temperatura ambiente – NBR 6892-1/2013.

4.2.3.1. Inclinação das nervuras

O ângulo de inclinação das nervuras foi determinado através de uma série de dez leituras de cada lado da barra e para cada diâmetro, obtendo valor médio.

4.2.3.2. Altura das nervuras

Para obtenção da altura média das nervuras foram realizadas três séries, contendo, cada uma delas, dez leituras consecutivas para cada diâmetro de barra utilizado, sendo o valor final a média entre os valores obtidos. A altura da nervura foi aferida por meio da medição com paquímetro. O procedimento de leitura consistiu em medir a distância máxima entre o ponto mais alto da nervura e o centro da barra.

4.2.3.3. Distância entre as nervuras

A distância entre as nervuras foi obtida pela distância entre pontos equivalentes das mesmas, em 10 espaços afastados e dividida pelo número de espaços. Utilizou-se para esse procedimento um paquímetro

4.2.4. Dosagem do concreto

Para a dosagem do concreto foi utilizado o software desenvolvido pelo grupo de pesquisa RECICLOS. Os traços foram dosados de acordo com o método ABCP sendo o teor de argamassa determinado empiricamente. Foram produzidos concretos com dois tipos de agregados, sendo o primeiro produzido somente com agregados naturais e o segundo somente com agregados de escória LD. Esses traços serão dosados para obtenção das resistências de 20 MPa e 40 MPa aos 28 dias.

4.2.5. Caracterização do concreto

4.2.5.1. Estado fresco

Os ensaios realizados para determinação das propriedades físicas no concreto no estado fresco são: Índice de consistência – NBR NM 67/1998; Massa específica – NBR 9833/2008 e Teor de ar incorporado – NBR NM 47/2002.

4.2.5.2. Estado endurecido

Todos os traços de concreto produzidos foram caracterizados no estado endurecido segundo as normas técnicas relacionadas a seguir.

4.2.5.2.1. Absorção, índice de vazios, massa específica

As propriedades físicas do concreto como absorção de água, índice de vazios e massa específica foram determinadas através da NBR 9778/2005.

4.2.5.2.2. Resistências mecânicas

O comportamento mecânico dos concretos foi determinado por meio da realização dos ensaios de resistência à compressão – NBR 5739/2007 e resistência à tração – NBR 7222/2011.

4.2.6. Determinação do coeficiente de conformação superficial

A determinação do coeficiente de conformação superficial foi feita através de ensaio de fissuração em tirantes de concreto, segundo a NBR 7477 – 1982.

Foram feitos nove tirantes prismáticos de concreto de seção transversal quadrada para cada diâmetro de barra estudada. As dimensões das seções e comprimentos dos tirantes foram determinadas de acordo com as seguintes equações:

$$d = \sqrt{\pi\Phi \left(\frac{\Phi}{4} + 7\right)}$$

Equação (2.8)

Onde:

d = lado da seção transversal quadrada do tirante.

Φ = diâmetro nominal da barra

$$l = 15xd \text{ (comprimento do tirante)}$$

Equação (2.9)

$$L = l + 120 \text{ (comprimento da barra)}$$

Equação (2.10)

Na tabela 4.3 encontram-se os valores das dimensões dos tirantes ensaiados para cada diâmetro de barra. E na figura 4.2 encontra-se ilustrado a forma utilizada na concretagem dos tirantes.

Tabela 4.3: Dimensões dos tirantes

	d (cm)	l (cm)	L (cm)
8,0 mm	4,25	65	78
10,0 mm	4,77	75	84
12,5 mm	5,36	85	95



Figura 4.2: Forma utilizada na concretagem dos tirantes.

Já o coeficiente de conformação superficial foi calculado pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{2,25.d}{\Delta l_{m\u00e9dio}} \quad \text{Equa\u00e7\u00e3o (2.11)}$$

Onde:

η = coeficiente de conforma\u00e7\u00e3o superficial.

d = lado da se\u00e7\u00e3o do tirante.

$\Delta l_{m\u00e9dio}$ = m\u00e9dia da dist\u00e2ncia m\u00e9dia entre as fissuras, considerando as quatro faces dos nove tirantes, para cada di\u00e2metro ensaiado.

5. Resultados

5.1. Teor metálico

A partir dos resultados obtidos e mostrados na Figura 5.1 pode-se observar que as amostras apresentaram teores significativos de metal.

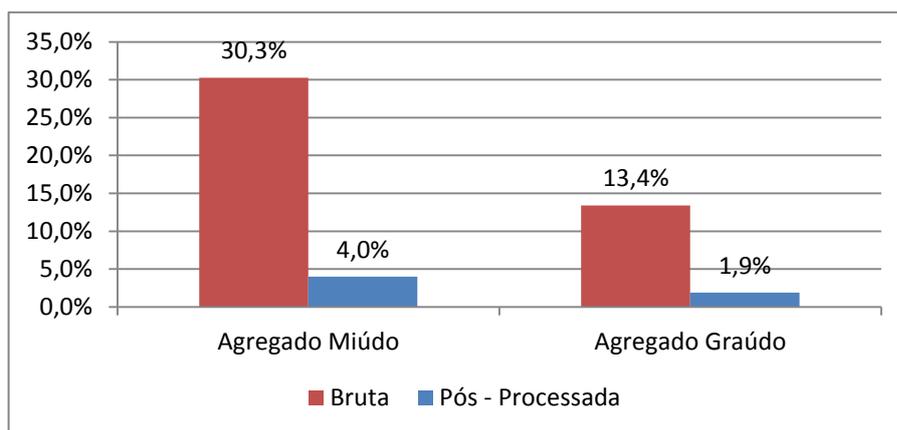


Figura 5.1: Teor metálico das escórias

Segundo Souza (2015, *apud* Peixoto et. al., 2015), é recomendado limites de 2,5% para inclusões metálicas. Por isso, foram feitas análises químicas nas amostras retidas no imã e observou-se que 75% da amostra era material metálico para o agregado miúdo e para o agregado graúdo 70% do material retido no imã era metálico. Portanto, para os resultados obtidos no gráfico é possível afirmar que 3,0% da amostra de agregado miúdo é metálico e 1,33% é material metálico para o agregado graúdo. Ou seja, o limite recomendado só ultrapassou para o agregado miúdo em 0,5%.

5.2. Granulometria

As curvas granulométricas dos agregados miúdos (escória processada, bruta e areia natural) e dos agregados graúdos (escória processada e brita 0) encontram-se nas Figuras 5.2 e 5.3, respectivamente. A dimensão máxima característica e o módulo de finura dos agregados miúdos e graúdos encontram-se nas tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente.

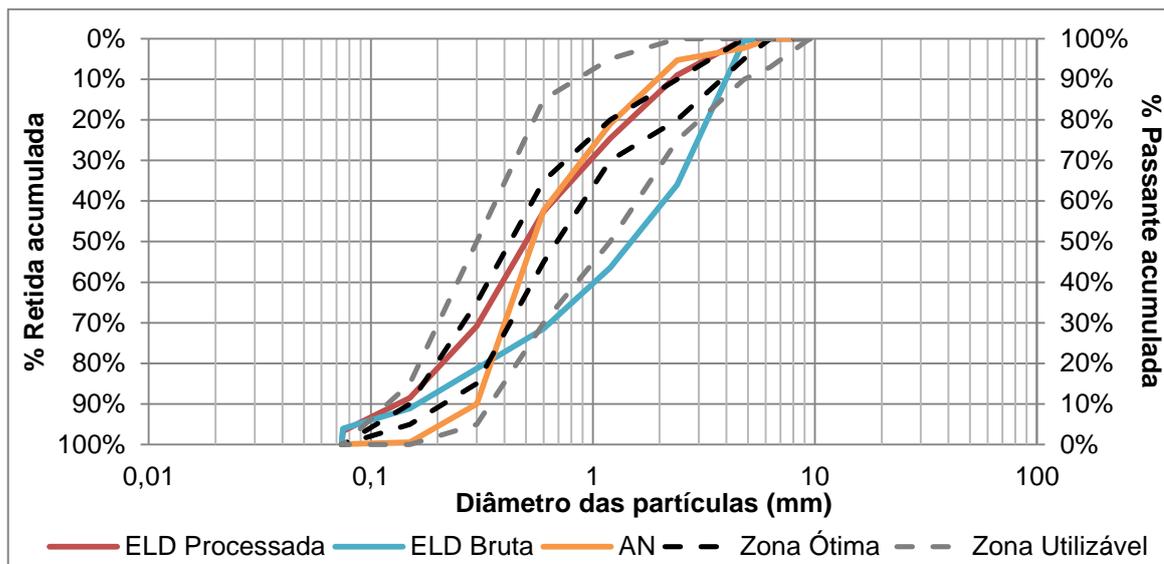


Figura 5.2: Curva granulométrica dos agregados miúdos

Tabela 5-1: Dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados miúdos

	Escória de aciaria	Escória Bruta	Areia natural
DMC	4,8	4,8	2,4
Módulo de finura	2,36	3,37	2,6

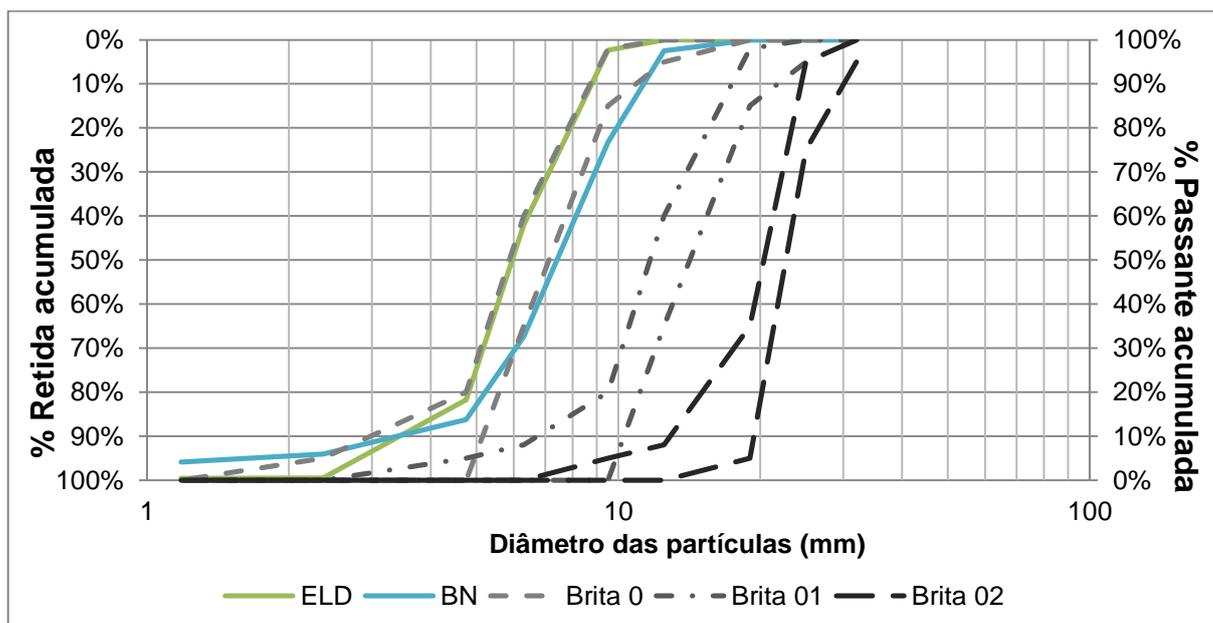


Figura 5.3: Curva granulométrica dos agregados miúdos.

Tabela 5-2: Dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados graúdos

	Escória de aciaria	Brita natural
DMC	9,5	12
Módulo de finura	5,82	5,87

A partir dos resultados observou-se que a escória processada para utilização como agregado miúdo encontra-se na zona ótima e com pouca variação em relação a areia natural e a escória a ser utilizada como agregado graúdo também apresenta pouca variação em relação a brita 0. Pela dimensão máxima característica observa-se que a escória processada a ser usada como agregado miúdo apresenta dimensões maiores já para agregado graúdo possui dimensão menor que o agregado graúdo natural.

5.3. Teor de umidade

A Figura 5.4 mostra os resultados dos ensaios de teor de umidade dos agregados.

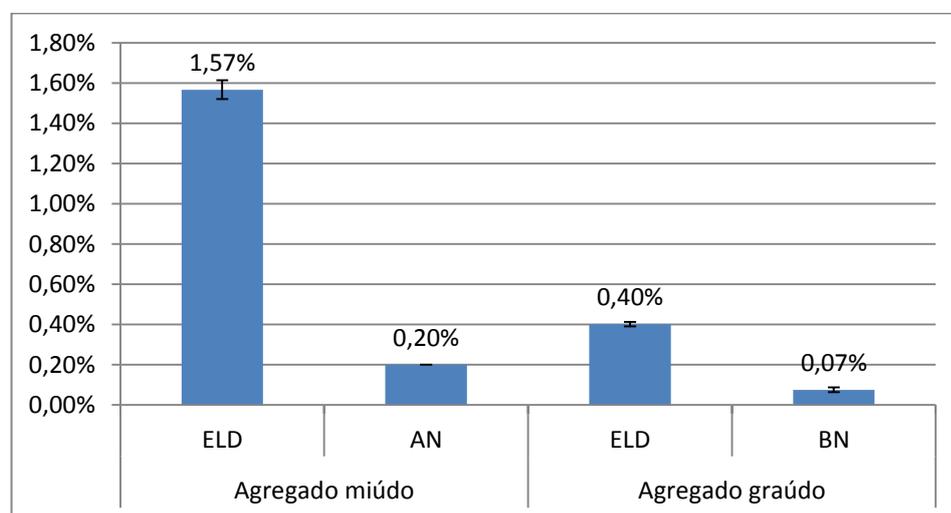


Figura 5.4: Teor de umidade dos agregados

Segundo Souza (2015) através dos resultados obtidos nota-se que os agregados miúdos de escória de aciaria apresentam teor de umidade com uma grande variação em relação à areia. Isso pode ser explicado pela maior quantidade material fino na escória do que na areia natural. Já os agregados graúdos de escória apresentaram

pouca variação em relação à brita, mas ainda sim um valor superior. Isso se deve a maior porosidade que a escória possui em relação à brita.

5.4. Material pulverulento

O gráfico da Figura 5.5 mostra que os agregados artificiais possuem mais materiais pulverulentos que os agregados naturais.

A NBR 7211/2009 que determina como valor máximo aceitável de 3 a 5% para agregados miúdos e 1% para agregados graúdos. Portanto os agregados miúdos naturais e os agregados graúdos artificiais (escória) apresentaram valores de material pulverulento dentro dos limites estabelecidos, já os agregados miúdos artificiais (escória) e os agregados graúdos naturais apresentam quantidade de material pulverulento acima dos limites aceitáveis.

Quanto maior a porcentagem de material pulverulento, maior é consumo de água para obter-se trabalhabilidade no concreto e conseqüentemente há uma diminuição da resistência mecânica do concreto devido à retração hidráulica e formação de poros no interior da matriz. (SOUZA, 2015)

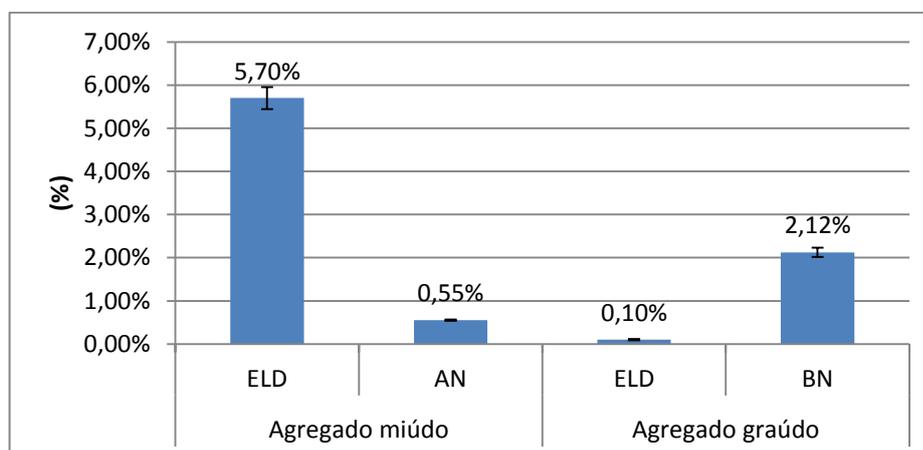


Figura 5.5: Material pulverulento dos agregados miúdos e graúdos

5.5. Massa específica

Os resultados dos ensaios de massa específica são mostrados na Figura 5.6 e a partir deles observa-se a massa específica dos agregados de escória é superior que

a massa específica dos agregados naturais em função da presença de óxidos metálicos. (SOUZA, 2015)

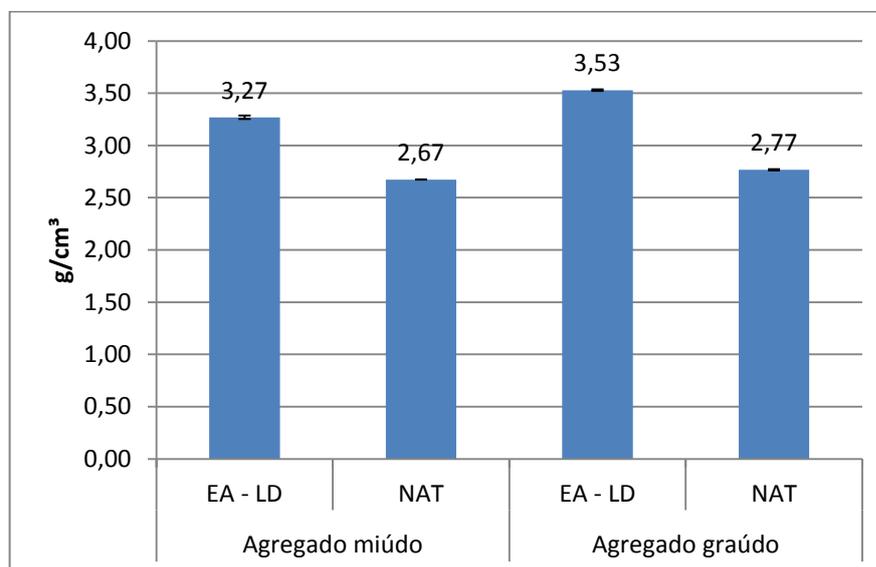


Figura 5.6: Massa específica dos agregados

5.6. Absorção de água

O gráfico da Figura 5.7 apresenta os resultados da absorção de água dos agregados miúdos e graúdos, da escória de aciaria, areia natural e brita 0. Observa-se que a escória de aciaria tem maior potencial para absorção de água do que os agregados naturais. (SOUZA, 2015)

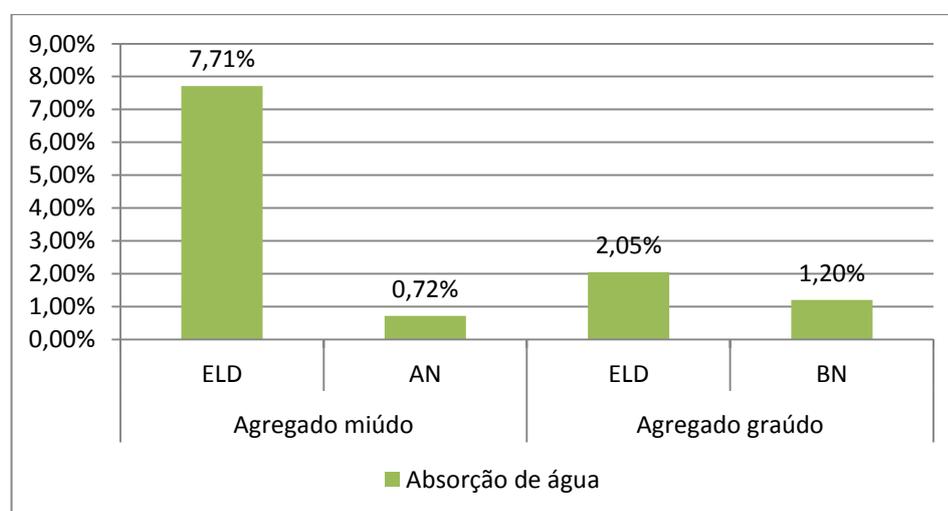


Figura 5.7: Absorção de água

5.7. Massa unitária

Pode-se observar pelo gráfico da Figura 5.8 que os agregados de escória possuem massa unitária superior que os agregados naturais, em função da presença de óxidos metálicos. (SOUZA, 2015)

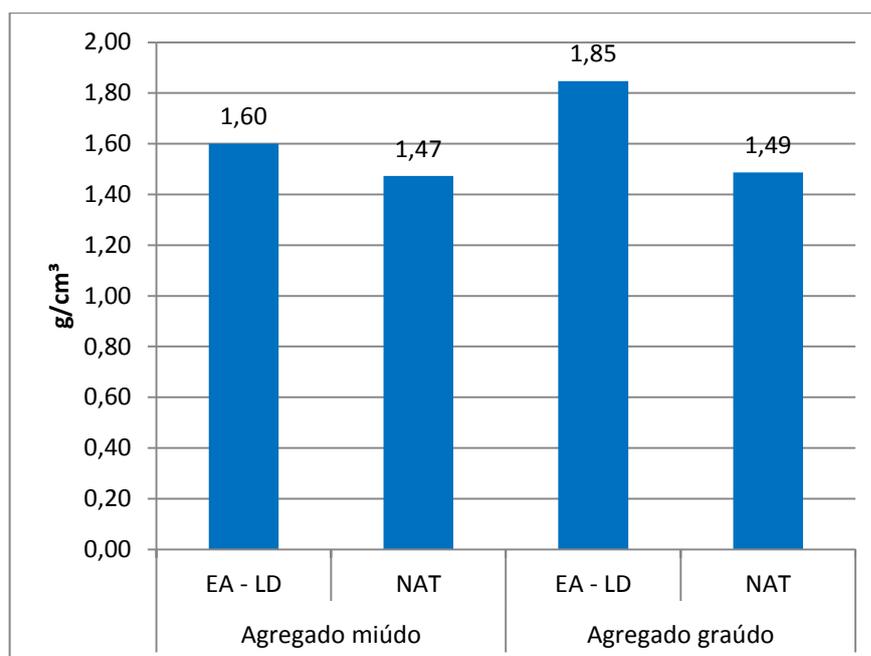


Figura 5.8: Massa unitária dos agregados

5.8. Caracterização das barras de aço

5.8.1. Inclinação das nervuras

Segundo a NBR 7480/2007, os eixos das nervuras transversais oblíquas devem formar, com a direção do eixo da barra, um ângulo entre 45° e 75°.

O ângulo de inclinação das nervuras foi determinado através de uma série de dez leituras de cada lado da barra e para cada diâmetro, obtendo valor médio, indicado na figura 5.10. A figura 5.9 ilustra o método. Na figura 5.11 encontram-se os valores das inclinações das nervuras para as barras ensaiadas por França (2004).



Figura 5.9: Leitura do ângulo de inclinação das nervuras

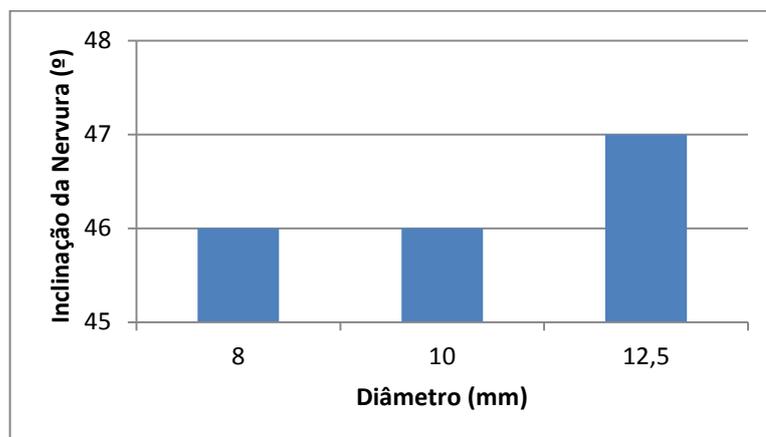


Figura 5.10: Valor médio da inclinação das nervuras

Diâmetro mm	inclinação Nervura (°)
10,0	51
12,5	46
16,0	47

Figura 5.11: Inclinação das nervuras. (FRANÇA, 2004)

5.8.2. Altura das nervuras

Segundo a NBR 7480/2007, para diâmetros nominais maiores ou iguais a 10,0 mm, a altura média das nervuras transversais oblíquas deve ser igual ou superior a 4% do diâmetro nominal, e para diâmetros nominais inferiores a 10,0 mm, essa altura deve ser igual ou superior a 2% do diâmetro nominal.

Para obtenção da altura média das nervuras foram realizadas três séries, contendo, cada uma delas, dez leituras consecutivas para cada diâmetro de barra utilizado, sendo o valor final a média entre os valores obtidos. A altura da nervura foi aferida por meio da medição com paquímetro. O procedimento de leitura consistiu em medir a distância máxima entre o ponto mais alto da nervura e o centro da barra. Este procedimento está ilustrado na figura 5.12 e 5.13. Na figura 5.14 é possível observar os resultados da altura média para cada diâmetro de barra e o respectivo valor requisitado por norma.



Figura 5.12: Medição do ponto mais baixo da altura das nervuras



Figura 5.13: Medição do ponto mais alto da altura das nervuras

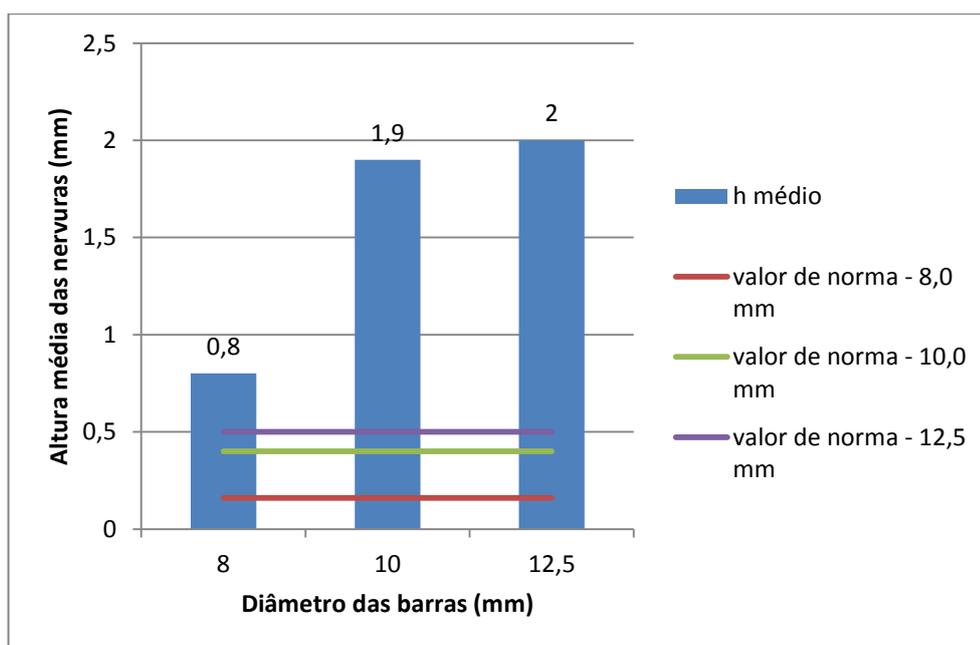


Figura 5.14: Valores médios das alturas das nervuras

5.8.3. Distância entre as nervuras

A distância entre as nervuras foi obtida pela distância entre pontos equivalentes das mesmas, em 10 espaços afastados e dividida pelo número de espaços. Utilizou-se para esse procedimento um paquímetro, a figura 5.15 ilustra a aferição. Segundo a NBR 7480 (2007), o espaçamento médio das nervuras transversais oblíquas,

medido ao longo de uma mesma geratriz deve estar entre 50% e 80% do diâmetro nominal. A figura 5.16 indica os valores da distância entre as nervuras. Na figura 5.17 encontram-se os valores das alturas e das distâncias médias das nervuras para as barras ensaiadas por França (2004).



Figura 5.15: Distância entre as nervuras

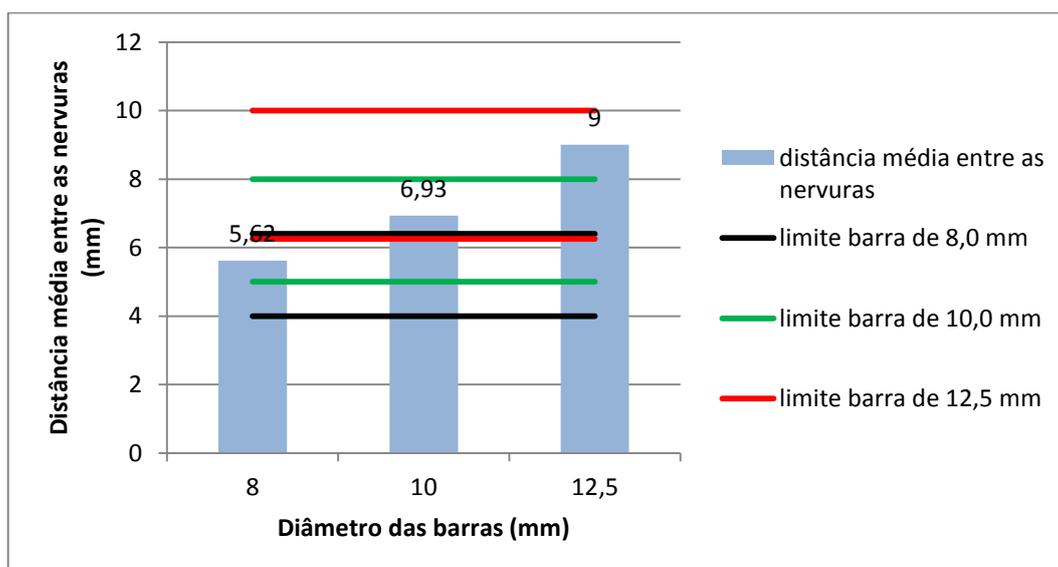


Figura 5.16: Gráfico com a distância média entre as fissuras e os limites de norma

DIÂMETRO (mm)	REQUISITO DA NORMA		RESULTADOS OBTIDOS	
	<i>h médio (mm)</i>	<i>distância (mm)</i>	<i>h médio (mm)</i>	<i>distância (mm)</i>
10.0	0.40	5.0 – 8.0	1.0	6.16
12.5	0.50	6.25 – 10.0	1.1	8.33
16.0	0.64	8.0 -12.8	1.5	9.15

Figura 5.17: Altura e distância média das nervuras. (FRANÇA, 2004)

5.8.4. Tensão de escoamento

Na figura 5.18, encontram-se as tensões de escoamento para as amostras das barras ensaiadas de cada diâmetro, 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm.

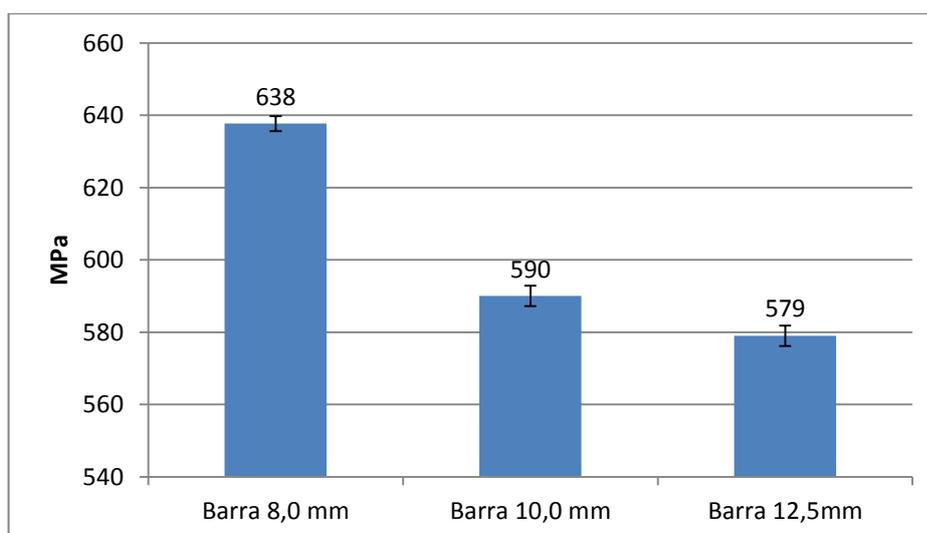


Figura 5.18: Tensões médias de escoamento das barras de aço CA-50

Observou-se que os valores foram superiores a resistência de 500 MPa que é característica para as barras do tipo CA-50.

Em seguida, foi realizada a verificação das tensões de escoamento que segundo a NBR 7480 (2007), tabela B.3, para barras CA 50, o limite de resistência deve ser 8% a mais da tensão de escoamento. Na figura 5.19, encontra-se os valores das tensões máximas e os valores das tensões verificadas.

Observou-se que as tensões máximas possuem valores superiores aos valores de estabelecidos por norma. (SOUZA, 2015)

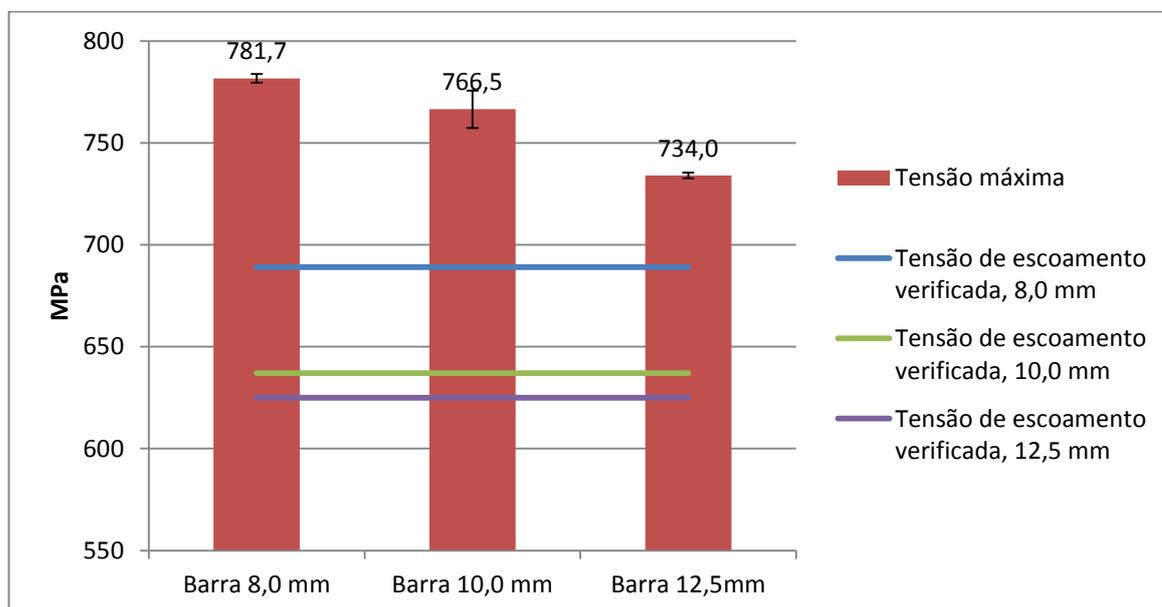


Figura 5.19: Tensões máximas das barras de aço CA-50

5.8.5. Alongamento e Massa linear

Na tabela 5.3, encontra-se os valores dos comprimentos inicial e final das barras de aço ensaiadas.

Tabela 5-3: Comprimentos inicial e final das barras de aço CA-50

	Comprimento inicial			Comprimento final		
	Barra 8,0 mm	Barra 10,0 mm	Barra 12,5mm	Barra 8,0 mm	Barra 10,0 mm	Barra 12,5mm
Amostra 1	28,0	29,5	31,4	30,2	32,0	34,3
Amostra 2	28,0	29,5	31,4	30,0	32,0	33,7
Amostra 3	28,0	29,5	31,3	30,1	31,8	34,0

A partir da figura 5.20, observa-se que os percentuais de alongamento das barras de aço de 10,0 mm e 12,5 mm ultrapassam os 8% de valor mínimo de alongamento

após ruptura, solicitado segundo a NBR 7480 (2007), tabela B.3. Apenas as amostras a barra de 8,0 mm, não atingiu esse valor mínimo.

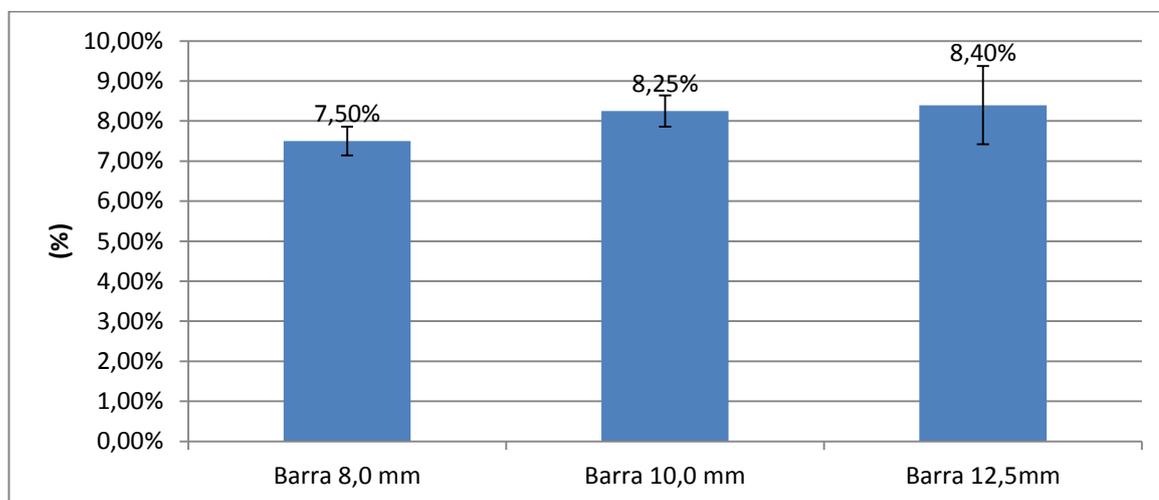


Figura 5.20: Gráfico com os resultados de alongamento das barras de aço CA-50

Mediram-se os comprimentos das barras e as amostras de cada tipo de barra foram pesadas. Em seguida, calculada a massa linear verificando-se em seguida o valor calculado com os valores solicitados na NBR 7480 (2007). As tabelas 5.4, 5.5 e 5.6 encontram-se esses resultados.

Tabela 5-4: Comprimento e massa das amostras das barras de aço

	Comprimento (cm)			Massa (g)		
	Barra 8,0 mm	Barra 10,0 mm	Barra 12,5mm	Barra 8,0 mm	Barra 10,0 mm	Barra 12,5mm
Amostra 1	28,0	29,5	31,4	107,4	176,7	291,7
Amostra 2	28,0	29,5	31,4	107,9	176,2	290,8
Amostra 3	28,0	29,5	31,3	107,1	175,4	290,4

Tabela 5-5: Resultados da massa linear para as amostras ensaiadas

Massa linear			
	Barra 8,0 mm	Barra 10,0 mm	Barra 12,5mm
	0,384	0,599	0,929
	0,385	0,597	0,926
	0,383	0,595	0,928
Média	0,384	0,597	0,928
Desvio	0,001	0,002	0,001

Tabela 5-6: Valores para massa linear de acordo com a norma

Valores da norma				
Barras	Massa nominal	Varição	Máxima	Mínima
8,0 mm	0,395	±7	0,423	0,367
10,0 mm	0,617	±6	0,654	0,580
12,5 mm	0,963	±6	1,021	0,905

Portanto, foi possível observar que para as amostras ensaiadas das barras de aço tipo CA-50, para os diâmetros de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm, os valores da massa linear encontrada estão em conformidade com a norma. A figura 5.21, mostra as massas lineares encontradas e os limites máximos e mínimos, de acordo com a norma.

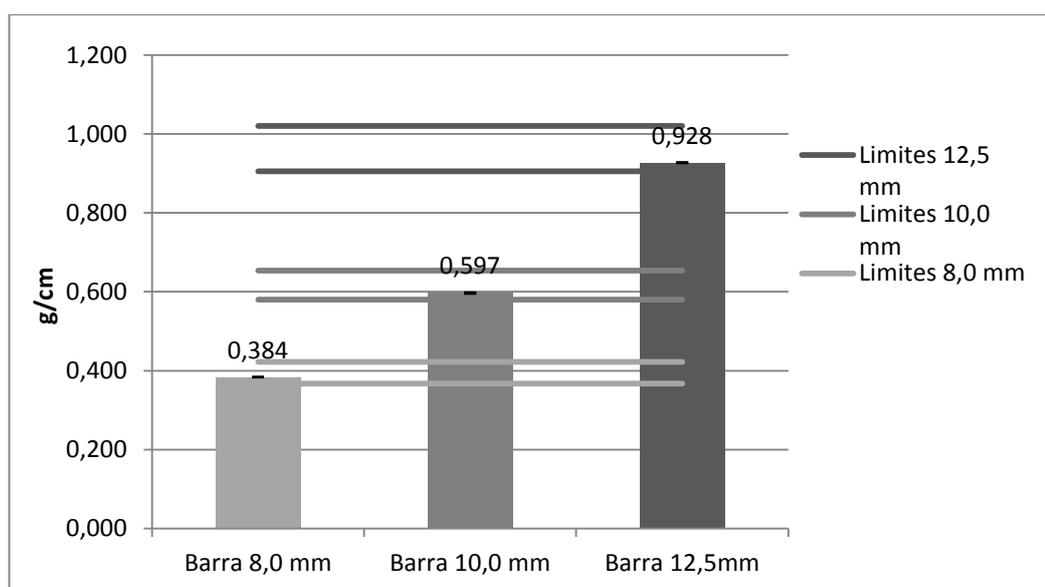


Figura 5.21: Gráfico com os resultados da massa linear e os limites máximos e mínimos, segundo NBR 7480 (2007).

5.9. Dosagem do concreto

Segundo Souza (2015), para definir a dosagem do concreto optou-se em utilizar o método ABCP, pois o método baseia-se na correlação linear que existe entre a proporção agregado/cimento e a relação água/cimento. E como o principal objetivo é avaliar o desempenho das escórias de aciaria como agregado total no concreto em comparação aos concretos produzidos com agregados naturais, o método ABCP é o mais indicado. Na tabela 5.7, encontram-se os traços, a relação água/cimento e os valores do slump obtidos para os concretos produzidos com escória de aciaria (CEA) e concretos produzidos com agregados naturais (CAN). A partir da tabela, percebe-se que para se obter a mesma resistência os dois tipos de concreto precisam de traços diferentes. Além disso, é relevante observar que os traços dos concretos com escória de aciaria possuem mais água do que os concretos com agregados naturais. Isso pode ser explicado devido a alta taxa de porosidade que a escória possui em relação aos agregados naturais. Outra observação é que os valores do slump estão dentro da margem aceitável e possuem praticamente a mesma consistência.

Tabela 5-7: Traços dos CEA e CAN, para 20 MPa e 40 MPa

	Cimento	Agregado miúdo	Agregado Graúdo	A/C	A/C real	Slump
ELD 20	1	2,05	2,66	0,55	0,65	7,5
NAT 20	1	1,87	2,54	0,55	0,59	7,8
ELD 40	1	1,04	1,68	0,36	0,46	8,0
NAT 40	1	0,92	1,54	0,36	0,41	7,9

Tabela 5-8: Percentagem de água nos concretos com escória e com agregados naturais

	% de água
EA - LD 20	18,2%
NAT 20	7,3%
EA - LD 40	27,8%
NAT 40	13,9%

5.10. Caracterização do concreto

5.10.1. Estado fresco

5.10.1.1. Massa específica

Os valores para massa específica dos concretos produzidos com escória de aciaria e com agregados naturais, no estado fresco, encontram-se na figura 5.22. É possível perceber que os concretos com escória (EA) possuem uma massa específica maior que os concretos com agregados naturais (NAT), isso pode ser explicado pelo fato de a massa específica das escórias assumir valores maiores que dos agregados naturais. (SOUZA, 2015)

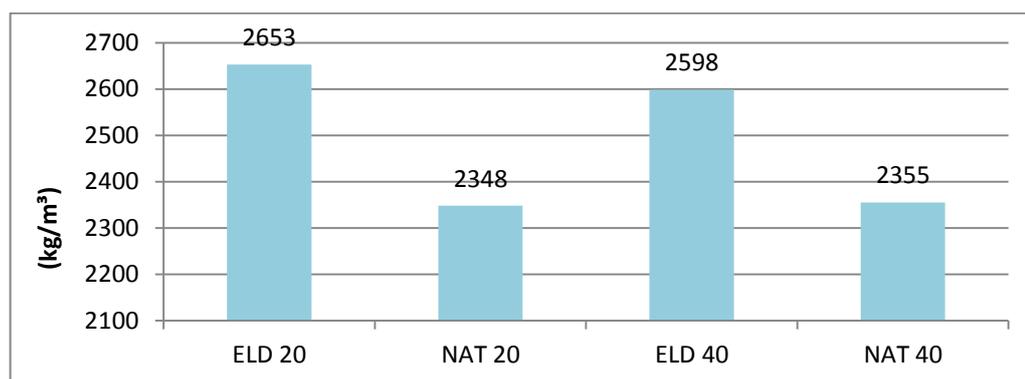


Figura 5.22: Massa específica do concreto produzido com escória (EA) e agregados naturais, no estado fresco.

5.10.1.2. Teor de ar incorporado

Na figura 5.23 é possível observar os valores de teor de ar incorporado dos concretos com escória e com agregados naturais. Observou-se que o teor de ar obteve um valor ligeiramente superior para os concretos com escória do que com os concretos de agregados naturais. O teor de ar pode estar relacionado com a forma dos grãos. (SOUZA, 2015)

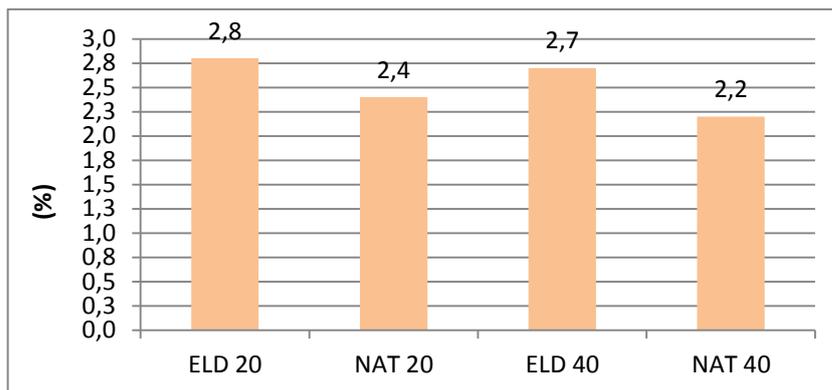


Figura 5.23: Resultados do teor de ar incorporado nos concretos com escória (EA) e concretos com agregados naturais (NAT).

5.10.2. Estado endurecido

5.10.2.1. Massa específica, índice de vazios e absorção de água

Os valores para massa específica seca, saturada e real dos concretos produzidos com escória de aciaria e com agregados naturais, no estado endurecido, encontram-se na figura 5.24. É possível perceber que os concretos com escória (EA) possuem uma massa específica maior que os concretos com agregados naturais (NAT), isso pode ser explicado pelo fato de a massa específica das escórias assumir valores maiores que dos agregados naturais e pela quantidade de agregados usada em cada dosagem. (SOUZA, 2015)

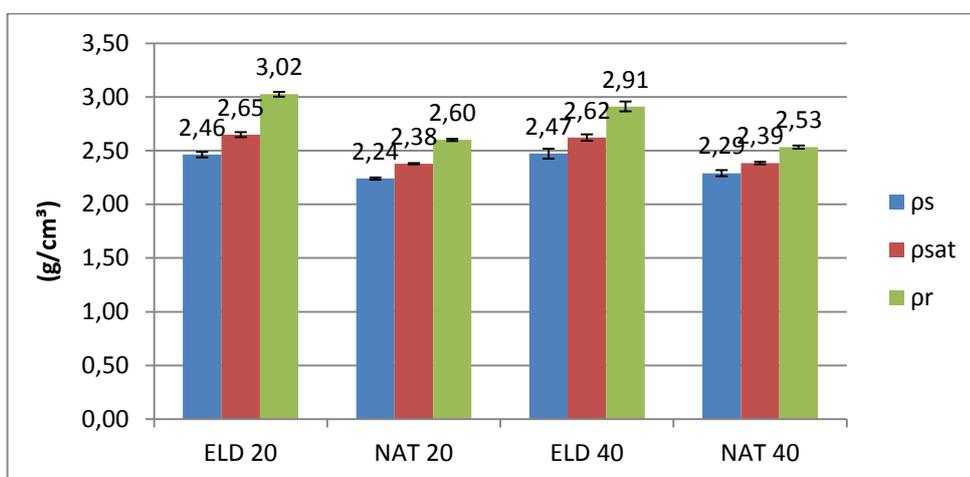


Figura 5.24: Massa específica seca, saturada e real dos concretos no estado endurecido.

Devido a porosidade das escórias e do maior consumo de água pelos concretos produzidos com escória, os índices de vazio e absorção de água são maiores nos concretos com escória (ELD) do que nos concretos com agregados naturais (NAT). Na figura 5.25, encontram-se os resultados dos índices de vazios e absorção de água. (SOUZA, 2015)

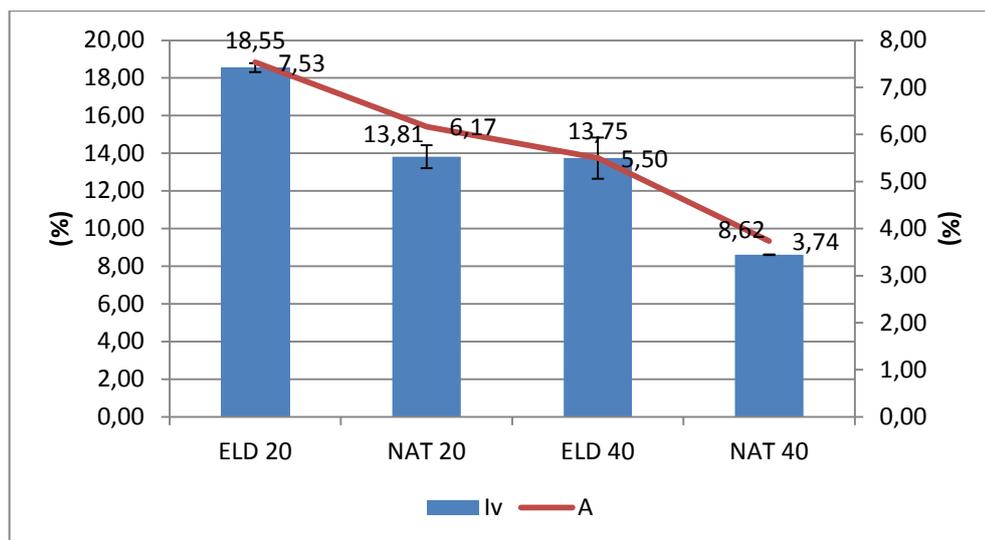


Figura 5.25: Resultados do índice de vazios e absorção de água

5.10.2.2. Resistência mecânica

A partir da figura 5.26 é possível observar que as dosagens propostas a partir do método ABCP, atingiram os valores de resistência do projeto. Os concretos produzidos com escória de aciaria apresentaram valores de resistência à compressão um pouco superiores aos concretos produzidos com agregados naturais.

Considerando que os concretos foram produzidos com cimento CPV-ARI, observa-se aos 3 dias que a dosagem de ELD20 apresentou um melhor desempenho mecânico relativamente a resistência a compressão, com uma resistência em torno de 20% superior ao concreto NAT20. Aos 28 dias, não se verificaram diferenças.

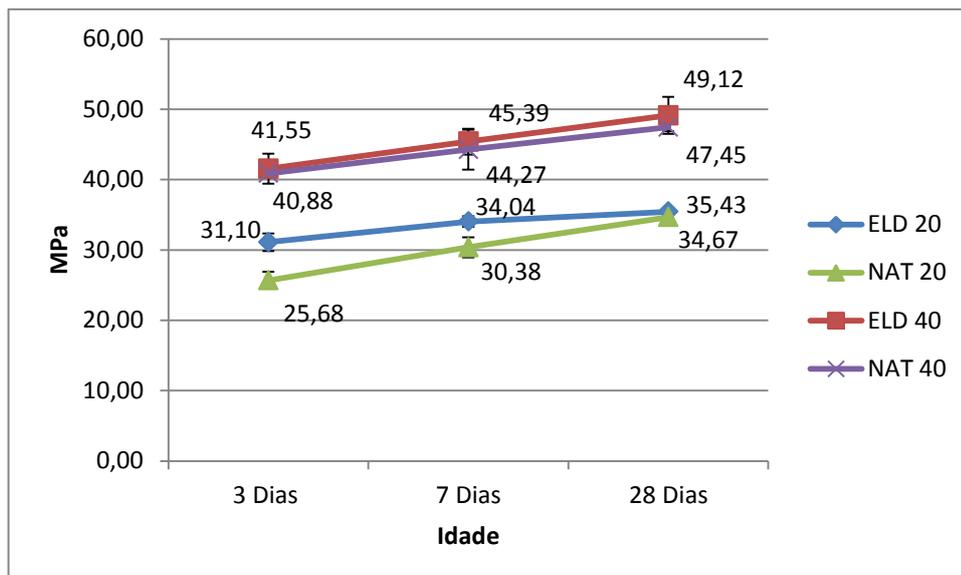


Figura 5.26: Valores de resistência à compressão dos concretos com escória e com agregados naturais.

Em relação à tração diametral os concretos produzidos com escória de aciaria também apresentaram valores um pouco superiores aos concretos produzidos com agregados naturais e a proporção da dosagem do ELD 20 aos 3 dias manteve-se em relação a dosagem do NAT20, como é mostrado na figura 5.27.

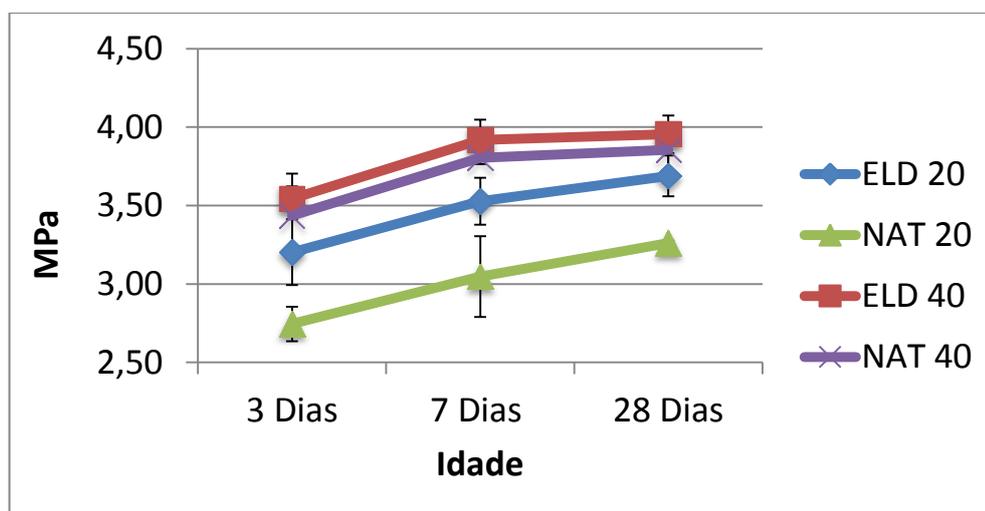


Figura 5.27: Valores de tração diametral dos concretos com escória e com agregados naturais

5.11. Coeficiente de conformação superficial

O ensaio seguiu a NBR 7477 – 1982. A figura 5.28, ilustra o ensaio.



Figura 5.28: Ensaio para determinação do coeficiente de conformação superficial de um tirante de concreto armado.

Os valores obtidos das distâncias médias entre as fissuras obtidas para as idades de 28 dias estão apresentadas nas figuras 5.29, 5.30 e 5.31. Onde foi feita uma média dos valores das distâncias entre as fissuras dos nove tirantes de cada concreto produzido: com escória de resistências de 20 e 40 MPa e concreto natural de resistências de 20 e 40 MPa. Calculou-se o coeficiente de variação das amostras dividindo-se os desvios pelas médias das distâncias entre as fissuras. Nas figuras encontram-se também os valores do CV (coeficiente de variação das amostras). Segundo França (2004), se os dados da amostra têm um CV igual ou maior que 25% a qualidade é considerada duvidosa.

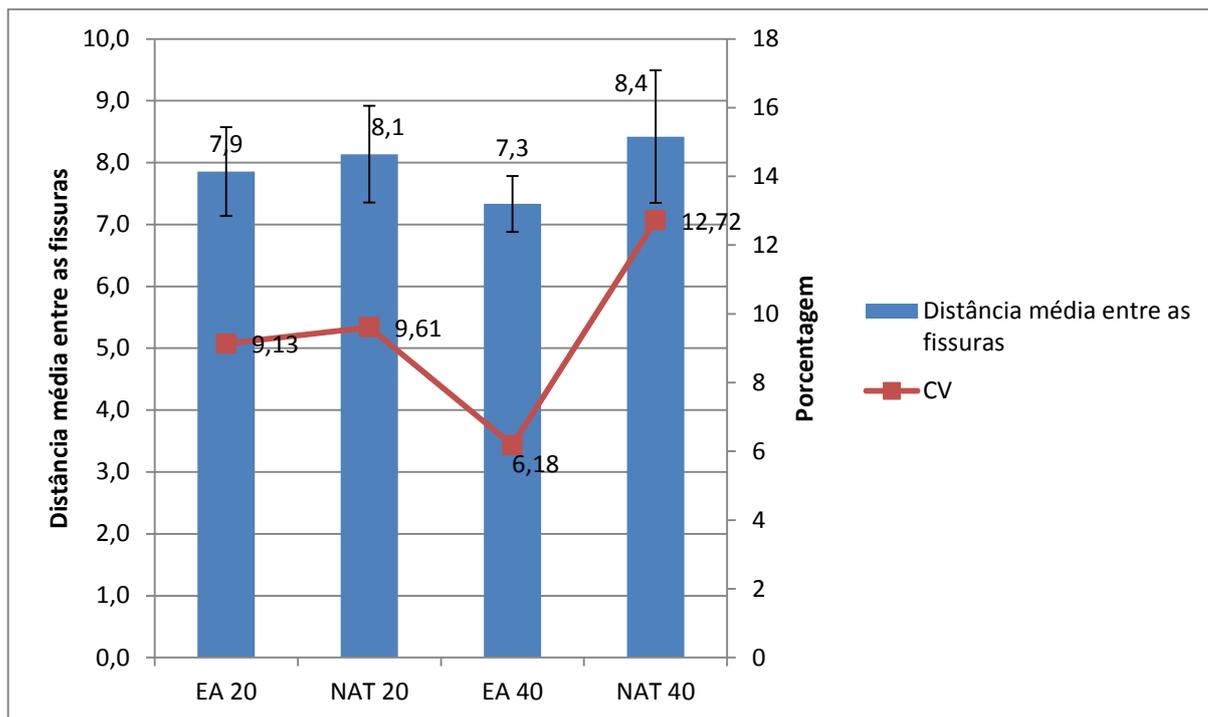


Figura 5.29: Distâncias médias entre as fissuras nos tirantes de concreto com barras de aço de 8,0 mm

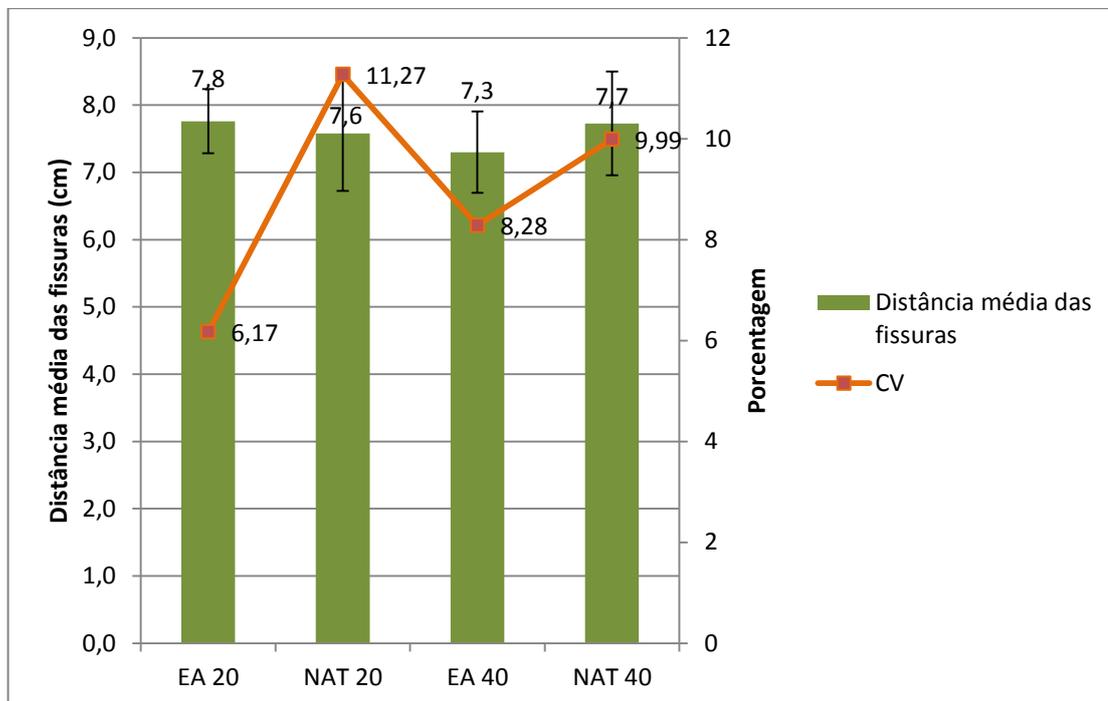


Figura 5.30: Distâncias médias entre as fissuras nos tirantes de concreto com barras de aço de 10,0 mm

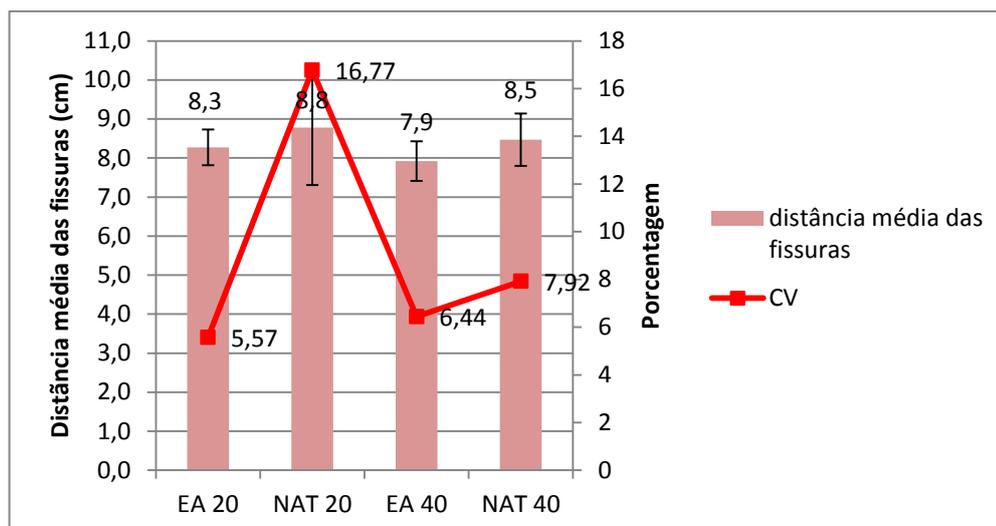


Figura 5.31: Distâncias médias entre as fissuras nos tirantes de concreto com barras de aço de 12,5 mm

Analisando os gráficos verifica-se que todas as amostras apresentaram um coeficiente de variação inferior a 25%, o que conduz a concluir que os resultados obtidos apresentaram uma boa qualidade.

Observa-se que os coeficientes de variação obtidos para o concreto convencional foram maiores do que os obtidos para o concreto com adição de escória. E à medida que o diâmetro das barras cresce há uma diminuição do valor do coeficiente de variação, exceto para o concreto convencional de 20 MPa.

O número médio de fissuras calculado para cada tirante ensaiado encontra-se na figura 5.32. Na figura 5.33 e 5.34 encontram-se quatro tirantes ensaiados.

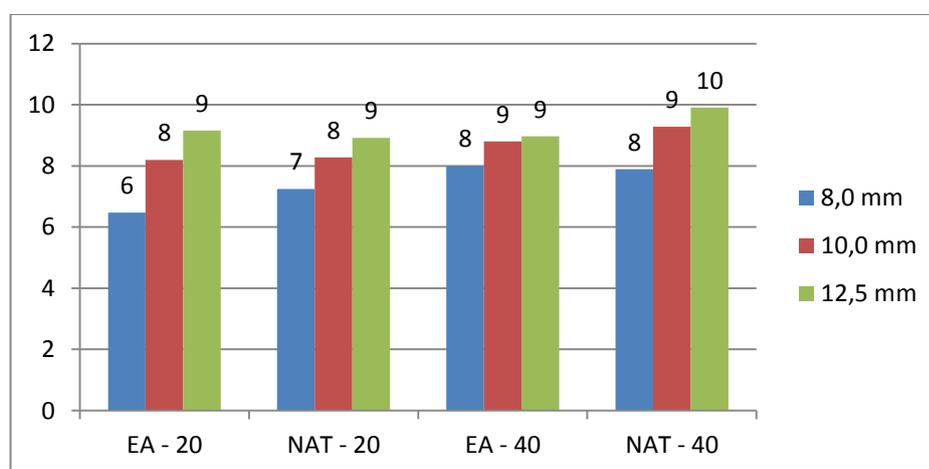


Figura 5.32: Número de fissuras nos tirantes ensaiados



Figura 5.33: Fissuração em tirantes de concreto com escória de 20 MPa



Figura 5.34: Fissuração em tirantes de concreto natural de 20 MPa

Analisando o gráfico da figura 5.32 verifica-se que o número de fissuras aumenta a medida que o diâmetro das barras de aço cresce.

Concluída a análise preliminar dos resultados, procedeu-se ao cálculo do coeficiente de conformação superficial. O gráfico da figura 5.35 mostra os resultados obtidos. Na figura 5.36 encontram-se o valor coeficiente de conformação superficial para as barras dos tirantes de concretos ensaiados por França (2004).

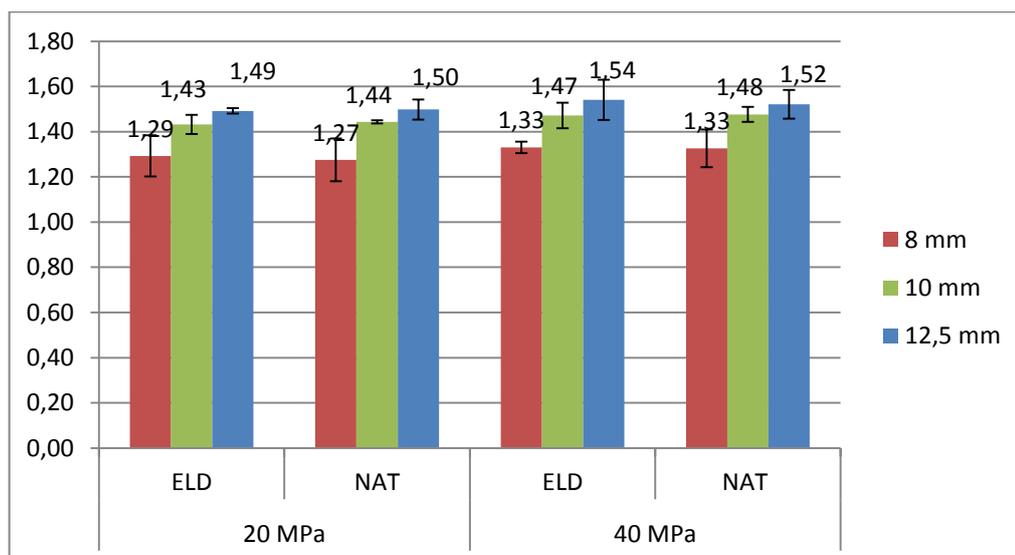


Figura 5.35: Coeficiente de conformação superficial das barras estudadas

Diâmetro da Barra (mm)	Concreto Convencional		Concreto com Resíduos	
	dias		dias	
	28	90	28	90
10,0mm	1,36	1,38	1,45	1,54
12,5mm	1,57	1,60	1,46	1,53
16,0mm	1,72	1,78	1,60	1,64

Figura 5.36: Coeficiente de conformação superficial para os tirantes de concretos com resíduos borracha analisados por França (2004)

Podemos observar que os valores do coeficiente de conformação superficial obtidos estão muito próximos aos valores encontrados por França (2004). Além

disso, pode-se observar que à medida que se aumenta o diâmetro da barra há um incremento no coeficiente de conformação (η), ilustrado na tabela 5.9. Este fato também foi observado por França (2004) que estudou o comportamento da aderência do aço com concreto em concretos fabricados com resíduos de borracha.

Tabela 5-9 Aumento em porcentagem do (η) em relação ao aumento do diâmetro da barra

	20 MPa		40 MPa	
	EA 20	NAT 20	EA 40	NAT 40
8,0 - 10,0 mm	10,79%	13,21%	10,61%	11,37%
10,0 - 12,5 mm	4,16%	3,79%	4,70%	3,01%

A NBR 7480/2007 determina que o valor mínimo para o coeficiente de conformação superficial seja igual a 1,0 para as barras de aço de diâmetro nominal inferior a 10,0 mm e 1,5 para as barras de aço de diâmetro igual ou superior a 10,0 mm. Frente a isto constatou-se que para as barras de aço com diâmetro de 8,0 mm os valores obtidos do coeficiente de conformação superficial atendem a normalização brasileira.

Para as barras de 10,0 mm os valores obtidos não atendem a normalização brasileira já que todos os valores obtidos foram ligeiramente inferiores a 1,5.

Para as barras de 12,5 mm, todos os valores atendem a normalização brasileira exceto para o concreto produzido com escória de aciaria de 20 MPa.

6. Conclusões

Após a revisão bibliográfica e a apresentação dos resultados constatou-se que:

- O processamento da escória de aciaria gerou agregados parecidos aos agregados naturais;
- As dosagens propostas a partir do método ABCP, tanto as executadas com escórias de aciaria quanto às executadas com agregado natural, atingiram os valores de resistência de projeto;
- Relacionando-se os resultados obtidos com os disponíveis na revisão bibliográfica verificou-se que o concreto com utilização de escória de aciaria em substituição à areia e à brita, pode ser utilizado em estruturas de concreto armado por apresentar um desempenho mecânico, relativamente à resistência a compressão e a tração, muito similar aos concretos convencionais;
- Observou-se que o número de fissuras foi praticamente o mesmo valor para todos os tipos de tirantes ensaiados;
- Ao analisar os resultados dos coeficientes de conformação superficial das barras estudadas, observou-se que se atingiu o valor requisitado por norma nos tirantes com barras de 8,0 mm e 12,5 mm, tanto nos concretos produzidos com escória de aciaria quanto nos concretos convencionais. Para os tirantes com barras de 10,0 mm os valores dos coeficientes foram ligeiramente inferiores aos de norma;
- Constatou-se que a medida que se aumenta o diâmetro da barra há um incremento no coeficiente de conformação (η), fato também observado por França (2004) que estudou o comportamento da aderência de barras de aço em concretos convencionais e com incorporação de resíduos de borracha em substituição à areia;
- A utilização de escória de aciaria no concreto é uma alternativa viável ao uso de agregados naturais. Além da viabilidade técnica, pode-se destacar a utilização de um resíduo que causa grande impacto ambiental para sua deposição e a diminuição da extração de areia e britas de jazidas naturais.

Como proposta de continuidade desta pesquisa, objetivando aprofundar a viabilidade da utilização de concretos com incorporação de escórias de aciarias em substituição de agregados naturais, outros estudos devem ser realizados, como por exemplo:

- Testar a durabilidade das matrizes de concreto escória com solução de cloreto em mesma concentração para verificação da expansibilidade.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 26 - Agregados - Amostragem**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 27 - Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 30 - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45 – Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 46 – Agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 47 – Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico**. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53 - Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739 – Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211 – Agregados para concretos – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222 – Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7477 – Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7480 – Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9775 – Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9833 – Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9939 – Agregado – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2011.

COSTA, V. C. M. C. **Influência da corrosão generalizada na aderência e comportamento estrutural de elementos de concreto armado**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, 2012.

FRANÇA, V. H. **Aderência Aço-Concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. 2004. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira – SP, 2004.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

INSTITUTO AÇO BRASIL – IABr: Estatísticas. Disponível em: <www.acobrasil.org.br/estatisticas.asp>.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2013**. Rio de Janeiro, 2013, 93p.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2014**. Rio de Janeiro, 2013, 49p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira – 6ª Edição**. Brasília, 2011, 28p.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica – USP.

JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar**. Disponível em <http://www.reciclagem.pcc.usp.br>. Acessado em 06/05/2013

SOUZA, B. P. **Aderência de barras de aço tipo CA em concreto sustentável**. 2015. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.

SOUZA, E. B. O. **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação**. 2007. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Belo Horizonte, 2007.