



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ADERÊNCIA DE BARRAS DE AÇO TIPO CA EM CONCRETO SUSTENTÁVEL

Ouro Preto – MG

2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ADERÊNCIA DE BARRAS DE AÇO TIPO CA EM CONCRETO SUSTENTÁVEL

AUTORA: BÁRBARA PONCIANO DE SOUZA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva

Ouro Preto - MG, setembro de 2015

S729a

Souza, Bárbara Ponciano de.

Aderência de barras de aço tipo CA em concreto sustentável [manuscrito] /
Bárbara Ponciano de Souza. - 2015.
xiii, 83f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto.
Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Programa de Pós graduação em Engenharia Civil.
Área de Concentração: Construção Metálica/ Estruturas.

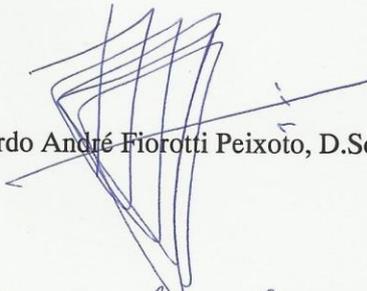
1. Aderência aço-concreto. 2. Escória de aciaria. 3. Sustentabilidade. 4.
Barras de aço. 5. Concreto. I. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. II. Silva,
Guilherme Jorge Brigolini. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 691.322

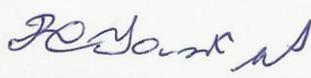
**ADERÊNCIA DE BARRAS DE AÇO TIPO CA EM CONCRETO
SUSTENTÁVEL**

AUTORA: BÁRBARA PONCIANO DE SOUZA

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 28 de Setembro de 2015, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:


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


Profa Arlene M. C. Sarmanho, D.Sc.– UFOP


Profa. Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga, D.Sc. – UFV

DEDICATÓRIA

A Deus.

Aos meus pais: Fábio e Cássia. Ao Tarsys!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar a força vital.

Agradeço a meu pai, pelo esforço e pelo apoio em tudo que pôde me ajudar, trabalhando comigo, nas tarefas pesadas, durante todo o projeto. À minha mãe, por me acompanhar, por sempre me encorajar, mesmo quando tudo parecia dar errado.

Ao Tarsys, pelo apoio incondicional em todas as etapas. Pelos dias de ensaio e de concretagem, pelos finais de semana, passados no laboratório, por estar sempre ao meu lado.

À minha família, pela companhia e por me fazer acreditar que seria possível. Aos meus primos: Fernando, Bruna e Fabrício, que também contribuíram para a produção dos corpos de prova. Em especial, agradeço à minha prima Paula, pelos ensaios de laboratório, pelas contribuições e pelo carinho. À minha tia Aparecida, pelos conselhos. À minha sogra Maria Helena, pelas orações e apoio.

Aos integrantes do grupo RECICLOS. Ao Vitor, pela dedicação, quem trabalhou de forma direta neste projeto. À Marina, Ana Luiza, Luiza e Wanna, pelos trabalhos desenvolvidos, pela amizade e pelo incentivo. Ao Rodrigo pelo trabalho em conjunto. Ao Diego, por todas as contribuições. Agradeço, também, ao Deyvid, Thamires, Taís, Carina e Keoma, pela convivência e pelas contribuições neste projeto. Agradeço, de forma especial, ao Júnior, que trabalhou comigo desde o começo, fazendo além do que podia, para me ajudar!

Ao professor Ricardo Fiorotti, pela oportunidade de trabalho, durante 5 anos no grupo RECICLOS. Agradeço-lhe por todo o aprendizado e pela orientação. Ao professor Guilherme, pelas sugestões e coorientação. À professora Eliene do CEFET-BH, quem me recebeu de portas abertas em seu laboratório. À professora Rita de Cássia, pelas contribuições na qualificação.

À UFOP e ao PROPEC, instâncias que me concederam a oportunidade de estudo. Aos professores, pela atenção e pelos conhecimentos compartilhados.

Ao Engenheiro Ney do NanoLab, pela disponibilidade, atenção e realização das análises químicas.

À ArcelorMittal, pelo fornecimento das barras utilizadas. Ao Túlio da empresa Sucataço, pela doação das chapas para construção do aparato necessário à realização do ensaio de aderência. Ao Dary, pela fabricação das fôrmas de madeira, feitas com tanto cuidado.

RESUMO

A proposta deste trabalho teve por objetivo investigar a aderência entre barras de aço tipo CA em concretos produzidos a partir da substituição total dos agregados naturais por agregados artificiais, obtidos do pós-processamento de escória de aciaria. Inicialmente, os materiais utilizados foram caracterizados, sendo a escória de aciaria caracterizada física e quimicamente. As barras de aço foram caracterizadas quanto às suas propriedades físicas e mecânicas. Com base nas propriedades físicas dos materiais utilizados, foram estudadas dosagens adequadas, por meio do método ABCP, para se obter concretos com resistência à compressão de 20 e 40 MPa aos 28 dias. Os concretos produzidos foram submetidos a ensaios de caracterização física, nos estados fresco e endurecido. Por meio desses ensaios, foi possível verificar que os concretos de escória e os concretos convencionais produzidos possuem propriedades mecânicas parecidas, para a mesma classe de resistência. Para a avaliação da aderência de barras, foram produzidos modelos que foram submetidos ao teste de arrancamento, segundo metodologia Pull-Out test - Rilem RC6 e ao ensaio de conformação superficial de acordo com a NBR 7477, observou-se que em ambos os ensaios, os concretos de escória apresentaram aderência aço-concreto próxima aos concretos convencionais. Os resultados dos testes de aderência mostraram também que a aderência é maior para barras de maiores diâmetros e para maior resistência à compressão.

Palavras-chave: Aderência aço-concreto. Escória de aciaria. Sustentabilidade. Barras de aço. Concreto. Agregados

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the adhesion between CA type steel bars in concrete produced from the full replacement of natural aggregates by artificial aggregates obtained from the post-processing of steel slag. Initially, the materials used were characterized, with the steel slag being physically and chemically characterized. Steel bars were characterized by their physical and mechanical properties. Based on the physical properties of the materials, suitable dosages were studied by ABCP method to obtain concretes with compressive strengths of 20 and 40MPa after 28 days. The concretes produced were subjected to physical characterization tests in fresh and hardened states. Through these trials, we found that the slag concrete and the conventional concrete produced have similar mechanical properties for the same strength class. For the evaluation of bars adhesion, models that were subjected to pullout test, according to the methodology Pull-Out Test - RILEM RC6, and the surface forming test, in accordance with the NBR 7477, were produced. It was observed that in both tests the slag concrete presented steel-concrete adhesion close to conventional concrete. The results of adhesion tests also showed that the adhesion is higher for larger diameters and greater compressive strength.

Keywords: Steel-concrete bond. Steel slag. Sustainability. Steel bars. Concrete. Aggregates

SUMÁRIO

Capítulo 1: Introdução	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo geral	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. Justificativa	3
1.3. Estrutura da dissertação.....	4
Capítulo 2: Revisão de literatura	5
2.1. Escória de aciaria	5
2.1.1. Geração da escória de aciaria	5
2.1.2. Produção de aço no Brasil e geração de rejeitos.....	7
2.1.3. Expansibilidade das escórias de aciaria	8
2.1.4. Processos de estabilização das escórias de aciaria.....	10
2.2. Aderência aço-concreto.....	11
2.2.1. Parcelas da aderência	11
2.2.2. Fatores que influenciam a aderência.....	14
2.2.3. Modos de ruptura	20
2.2.4. Análise experimental	21
2.2.5. Determinação da resistência à aderência	29
2.2.6. Modelos para curva tensão x deslizamento	31
2.3. Módulo de elasticidade	35
Capítulo 3: Materiais e métodos.....	38
3.1. Agregados Naturais	38
3.2. Agregado artificial	38
3.3. Processamento da escória de aciaria	39
3.4. Caracterização física dos agregados.....	41

3.5. Caracterização química	42
3.6. Cimento	43
3.7. Barras	43
3.8. Caracterização das barras	43
3.9. Dosagem do concreto	44
3.10. Produção dos concretos, moldagem e cura dos corpos de prova	44
3.11. Caracterização física do concreto.....	45
3.11.1. Propriedades no estado fresco	45
3.11.2. Propriedades no estado endurecido	46
3.12. Caracterização mecânica do concreto	47
3.12.1. Resistência à compressão, tração por compressão diametral	48
3.12.2. Módulos de elasticidade	48
3.13. Aderência	51
3.13.1. Pull-out test.....	51
3.13.2. Conformação superficial.....	53
Capítulo 4: Resultados e discussão	56
4.1. Processamento da escória.....	56
4.2. Caracterização física dos agregados.....	57
4.2.1. Granulometria	57
4.2.2. Massa específica e massa unitária	59
4.2.3. Material pulverulento.....	59
4.2.4. Umidade superficial, absorção de água e teor de umidade.....	60
4.2.5. Morfologia dos grãos	61
4.3. Caracterização química – Fluorescência de raios X.	63
4.4. Caracterização das barras	63
4.5. Propriedades do concreto – estado fresco	65
4.6. Propriedades do concreto – estado endurecido	66

4.6.1. Absorção de água e índice de vazios	66
4.6.2. Massa específica	67
4.6.3. Resistência à compressão e tração por compressão diametral.....	67
4.6.4. Módulo de elasticidade	69
4.7. Aderência	69
Capítulo 5: Considerações finais	72
5.1. Conclusões	72
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	74
Referências	75

LISTA DE TABELA

Tabela 2.1: Composição química das escórias	7
Tabela 2.2: Produtos de hidratação.....	10
Tabela 2.3: Parâmetros para definição da relação tensão de aderência x deslizamento para barras nervuradas.....	32
Tabela 2.4: Regressões exponenciais de pré-pico dos modelos de arrancamento (C30)	34
Tabela 3.1: Características do cimento CP V-ARI Fácil da HOLCIM	43
Tabela 3.2: Dimensões dos tirantes	54
Tabela 4.1: Dimensão máxima característica e módulo de finura.....	58
Tabela 4.2: Composição química da escória	63
Tabela 4.3: Composição dos traços em massa	65
Tabela 5.1: Caracterização física dos agregados	72
Tabela 5.2: Caracterização física do concreto	73
Tabela 5.3: Propriedades mecânicas do concreto	73
Tabela 5.4: Módulos de elasticidade	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Consumo de agregados no Brasil (IBRAM, 2012).....	2
Figura 2.1: Esquema da produção de aço (IABr, 2014)	6
Figura 2.2: Aderência por adesão (FUSCO, 1995)	12
Figura 2.3: Aderência por atrito (FUSCO, 1995).....	12
Figura 2.4: Aderência mecânica (FUSCO, 1995).....	13
Figura 2.5: Transferência dos esforços de aderência (FUSCO, 1995)	14
Figura 2.6: Formação de poros sob barras horizontais devido à segregação e acúmulo de água (LEONHARDT E MONNING, 1977)	16
Figura 2.7: Fissuras de fendilhamento (MACGREGOR, 1988)	18
Figura 2.8: Representação da superfície da nervura e da superfície lateral (REHM, 1969 apud LEONHARDT E MÖNNIG, 1977)	18
Figura 2.9: Esquema com os termos da fórmula da área relativa das nervuras (ACI, 2003) ...	19
Figura 2.10: Curva tensão x escorregamento para modos de ruptura (DUMÊT, 2003)	20
Figura 2.11: Fendilhamento longitudinal do concreto (FUSCO, 1995).....	21
Figura 2.12: Corpos de prova para ensaio de arrancamento e as respectivas variações de tensão. (LEONHARDT e MÖNNIG, 1977).....	22
Figura 2.13: Detalhes do ensaio de aderência. (LEONHARDT e MÖNNIG, 1977).....	23
Figura 2.14: Corpo de prova - Pull-out test (RILEM RC 6, 1983)	23
Figura 2.15: Modelo experimental (REHM, 1961)	24
Figura 2.16: Modelo experimental: Tipo A (RILEM RC 5, 1983)	25
Figura 2.17: Modelo experimental: Tipo B (RILEM RC 5, 1983).....	25
Figura 2.18: Modelo experimental – Beam end test (FRANÇA, 2004).....	26
Figura 2.19: Ensaio de arrancamento com anel circunferencial (FRANÇA, 2004).....	27
Figura 2.20: Corpo de prova para ensaio das quatro barras (CASTRO, 2002).....	28
Figura 2.21: Ensaio de conformação superficial (NBR 7477, 1982)	28
Figura 2.22: Curva tensão de aderência x deslizamento (CEB-FIB 2010)	32
Figura 2.23: Tipos de módulo de elasticidade.....	36

Figura 2.24: Comportamento tensão x deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto (ALMEIDA, 2005)	37
Figura 3.1: Fluxograma da metodologia utilizada.....	38
Figura 3.2: Escória de aciaria LD.....	39
Figura 3.3: Peneiramento da escória	40
Figura 3.4: Princípio de funcionamento do tambor magnético (INBRAS).....	41
Figura 3.5: Estereoscópio	42
Figura 3.6: Espectrômetro	42
Figura 3.7: Moinho de alta eficiência.....	42
Figura 3.8: Caracterização das barras tipo CA utilizadas.....	44
Figura 3.9: Moldagem dos cubos	45
Figura 3.10: Caracterização do concreto no estado fresco	46
Figura 3.11: Detalhes do ensaio de módulo de elasticidade.....	50
Figura 3.12: Execução do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico	50
Figura 3.13: Zona não aderente	51
Figura 3.14: Detalhe do dispositivo de apoio para CPs – placa de apoio	52
Figura 3.15: Detalhe do dispositivo.....	52
Figura 3.16: Fôrmas dos tirantes	55
Figura 3.17: Execução do ensaio de conformação superficial	55
Figura 4.1: Teor de metálico das escórias	56
Figura 4.2: Distribuição granulométrica – Agregado miúdo.....	57
Figura 4.3: Distribuição granulométrica – Agregado graúdo.....	58
Figura 4.4: Massa específica e massa unitária.....	59
Figura 4.5: Material pulverulento	60
Figura 4.6: Umidade superficial, absorção de água e umidade	60
Figura 4.7: Morfologia agregado miúdo – Aumento 45X.....	61
Figura 4.8: Morfologia agregado graúdo – Aumento 7,5x e 15X.....	62

Figura 4.9: Variação para massa linear barras tipo CA.....	64
Figura 4.10: Tensão de escoamento	64
Figura 4.11: Tensão máxima	65
Figura 4.12: Teor de ar incorporado	66
Figura 4.13: Massa específica - Estado fresco	66
Figura 4.14: absorção de água e índice de vazios.....	66
Figura 4.15: Massa específica - Estado endurecido	67
Figura 4.16: Resistência à compressão.....	68
Figura 4.17: Resistência à tração por compressão diametral.....	68
Figura 4.18: Módulos de elasticidade.....	69
Figura 4.19: Tensão de aderência - ELD 20.....	70
Figura 4.20: Tensão de aderência - NAT 20	70
Figura 4.21: Tensão de aderência - ELD 40.....	70
Figura 4.22: Tensão de aderência - NAT 40	70
Figura 4.23: Coeficiente de conformação superficial.....	71

Capítulo 1: Introdução

A indústria da construção civil gera impactos ambientais desde a extração de recursos naturais, passando pela execução dos serviços, até o descarte final dos resíduos gerados. (BARRETO, 2005)

Segundo La Serna e Rezende (2009), o crescimento populacional, juntamente, com o crescimento da quantidade de bens e serviços induzem a um aumento no consumo de minerais para uso direto na construção civil, uma vez que as indústrias de agregados proveem insumos para a infraestrutura urbana, industrial e malha viária nacional. Os agregados para a indústria da construção civil são as substâncias minerais mais consumidas e, portanto, as mais significativas em termos de quantidades produzidas no mundo. (FERREIRA e PEREIRA, 2009)

A importância do setor de agregados para a sociedade se destaca por estar diretamente ligada à qualidade de vida da população relativamente a construção de moradias, saneamento básico, pavimentação e construção de rodovias, vias públicas, ferrovias, hidrovias, portos, aeroportos, pontes, viadutos e etc. (FERREIRA e PEREIRA, 2009)

O indicador BRASIL para o consumo de agregados em 2011 foi de 3,50 t/habitante. O consumo per capita brasileiro evoluiu de 3,3 toneladas de agregados por habitante/ano em 2010 para 3,5 t/hab. em 2011, ou seja, representando um acréscimo de 6%. Comparativamente aos países desenvolvidos, como por exemplo, os Estados Unidos, o Brasil ainda está muito distante do valor médio histórico de 6 a 7 toneladas por habitante/ano. (IBRAM, 2012)

Com base na correlação entre a evolução da demanda por cimento e o Produto Interno Bruto (PIB) nacional, projetou-se o crescimento no período 2012 a 2022, partindo-se de uma estimativa de demanda de 696 milhões de toneladas em 2012 e atingindo-se o significativo valor de 1,12 bilhão de toneladas em 10 anos. O gráfico da Figura 1.1, apresenta a evolução das curvas de agregados, areia e brita no período de 1997 a 2022. (IBRAM, 2012)

De acordo com La Serna e Rezende (2009), a utilização dos agregados está relacionada ao seu tamanho e granulometria. Chegam ao consumidor final misturados ao cimento, ou sem nenhuma mistura aglomerante. Entretanto, é misturado ao concreto que os maiores volumes de agregados chegam ao consumidor final. O concreto por sua vez, é um dos elementos de construção mais utilizado no mundo, no entanto, a maioria dos concretos utilizados em nossas

construções apresenta resistência à tração relativamente baixa, levando à necessidade de sua utilização conjunta com o aço, denominado de concreto armado. A tecnologia do concreto armado, bastante difundida no Brasil e no mundo, fundamenta-se no perfeito relacionamento entre uma matriz cimentícia e barras de aço tipo CA (concreto-armado), sendo essa relação regida essencialmente por questões relacionadas à aderência.

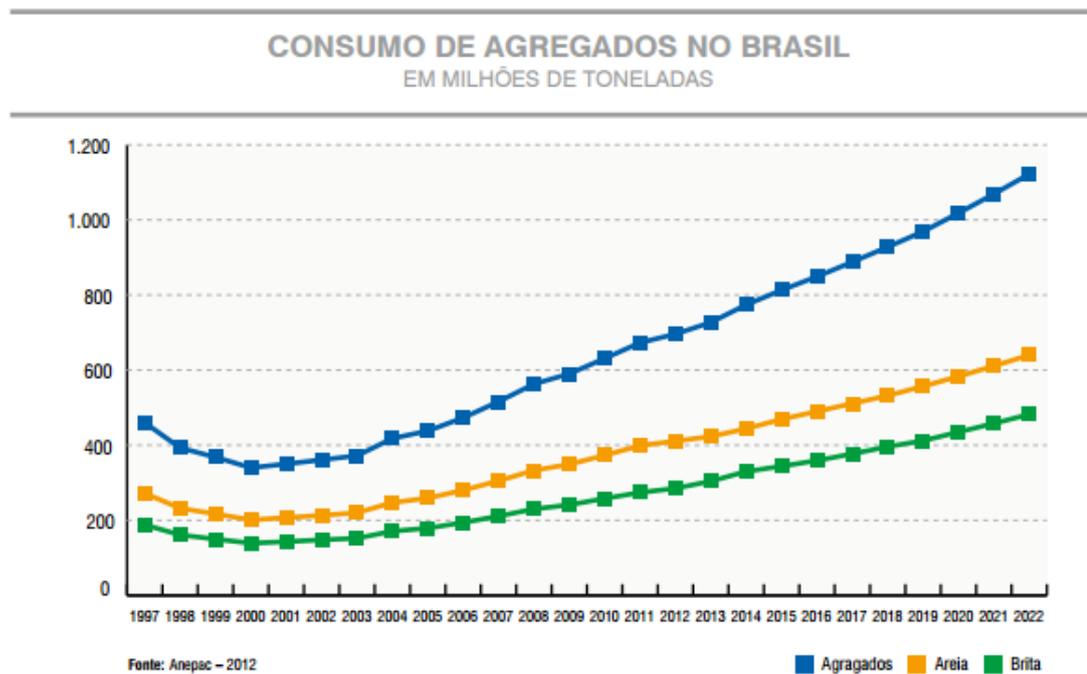


Figura 1.1: Consumo de agregados no Brasil (IBRAM, 2012)

1.1. Objetivos

1.1.1. *Objetivo geral*

Avaliar a aderência de barras de aço tipo CA50 em concretos sustentáveis, obtidos a partir da substituição de agregados naturais por agregados obtidos do pós-processamento de escórias de aciaria.

1.1.2. *Objetivos específicos*

- Dimensionar misturas produzidas a partir da substituição de agregados naturais por resíduo sólido de siderurgia – escória de aciaria para aplicação em obras correntes de engenharia (ELD – concreto de escória de aciaria);

- Produzir agregados a partir do pós-processamento de escória de aciaria para produção das misturas de cimento Portland;
- Determinar propriedades físicas e elasto-mecânicas do concreto ELD comparativamente ao concreto fabricado convencionalmente a partir de agregados naturais (NAT);
- Determinar a tensão de aderência para barras de aço tipo CA50 para concretos ELD comparativamente aos concretos NAT, considerando os diâmetros de 8,0 mm; 10,0 mm e 12,5mm.
- 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.

1.2. Justificativa

A produção de aço no Brasil é responsável pela geração de grande quantidade de rejeitos, sendo que apenas no ano de 2013 foram gerados 17,7 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos, normalmente armazenados em grandes pátios de rejeitos, que consomem recursos financeiros para sua manutenção e monitoramento e ainda impactam significativamente no meio ambiente (IABr, 2014).

Paralelamente a este cenário, a construção civil também causa impactos ambientais consideráveis, uma vez que o setor consome 75% de todos os recursos naturais e 44% da energia produzida no país. (LAURIANO, 2013). A exemplo disso, estima-se que a demanda de agregados para o ano de 2022 no Brasil, seja de 1,12 bilhão de toneladas, o que representaria um acréscimo de consumo aproximado de 66%, relativamente a demanda registrada em 2011. (IBRAM, 2012). Adicionalmente, observa-se que no entorno das cidades, agregados naturais tornam-se cada vez mais escassos, devido ao crescente controle ambiental da extração das matérias primas, o que eleva o custo da matéria prima e onera o processo de engenharia.

Dessa maneira, tendo em vista a possibilidade de se agrupar duas grandes forças da cadeia produtiva de nosso país, de um lado a siderurgia e de outro a indústria da construção civil, em uma ação em que o rejeito gerado possa ser empregado como matéria prima, e levando em consideração a importância do concreto armado no panorama nacional e mundial, associado a necessidades emergentes do estabelecimento de processos cada vez mais responsáveis e sustentáveis, propõe-se neste trabalho estudo da aderência de barras de aço tipo CA para

concretos sustentáveis produzidos a partir da substituição total de agregados naturais por agregado de escória de aciaria LD.

1.3. Estrutura da dissertação

Essa dissertação está dividida em 5 capítulos. O primeiro capítulo apresenta informações sobre a importância e o consumo de agregados na indústria da construção. No segundo capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a escória de aciaria, levando-se, em consideração, as rotas de produção do aço e a geração do resíduo em estudo, a expansibilidade da escória e métodos para sua estabilização volumétrica. Neste capítulo, apresenta-se também uma revisão bibliográfica sobre a aderência aço-concreto, descrevendo as parcelas que a compõe, os fatores que a influenciam, os modos de ruptura pela perda de aderência, os ensaios mais utilizados para sua determinação, as prescrições normativas e alguns modelos teóricos para a curva Tensão de aderência x Deslizamento.

O terceiro capítulo apresenta os materiais utilizados e descreve a metodologia adotada neste trabalho, mostrando os procedimentos para o processamento da escória de aciaria, a caracterização dos agregados, dosagem das misturas, caracterização do concreto (estado fresco e estado endurecido) e ensaios de aderência. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa, bem como suas discussões. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas e as sugestões para trabalhos futuros visando à continuidade desta pesquisa.

Capítulo 2: Revisão de literatura

2.1. Escória de aciaria

A escória de aciaria é um resíduo da fabricação do aço. É produzida durante o processo de refino do gusa dentro dos fornos de elaboração do aço. A escória ocorre como líquido fundido e é uma solução complexa de silicatos e óxidos que se solidificam após o resfriamento. (SOUZA, 2007)

2.1.1. *Geração da escória de aciaria*

A produção de aço se dá basicamente por dois processos distintos e as usinas siderúrgicas poder ser classificadas em integradas e semi-integradas de acordo com o processo adotado. (CALDAS, 2011). A Figura 2.1 ilustra esses dois processos que são apresentados formalmente a seguir.

As usinas integradas possuem, basicamente, as etapas de redução, refino e laminação e utilizam-se como matéria prima o minério de ferro, carvão e materiais fundentes. Neste tipo de produção obtém-se do processo de refino feito através do convertedor a oxigênio Linz Donawitz a escória de aciaria LD. (POLESE, 2006; LOBATO, 2014)

Neste processo, a sucata e o gusa líquido são adicionados e, em seguida, é introduzida uma lança injetando oxigênio gasoso a alta velocidade. Após a fusão do metal, adiciona-se a cal virgem e a cal dolomítica. O oxigênio e a cal virgem são usados para a eliminação de elementos indesejáveis no aço, como carbono, silício e fósforo e a cal dolomítica é usada na proteção do revestimento refratário. Por fim, obtém-se o aço e a geração da escória de aciaria. Esses dois materiais ficam separados por diferença de densidade no interior do conversor. (POLESE et al., 2006)

As usinas semi-integradas utilizam como matéria prima gusa sólido e sucata. Essas unidades realizam as etapas de refino e a laminação, neste processo, o refino é feito através de convertedores a arco elétrico de onde obtém-se a escória de aciaria elétrica. De acordo com Polese (2006), o processo de produção de aço em forno elétrico (EAF) consiste na fusão de sucata de aço, gerada por um arco elétrico. Após a fusão, injeta-se oxigênio, através de uma lança, a fim de promover as reações de carbono, silício e fósforo. A adição de CaO e MgO promovem as reações de refino que conduzem à formação de escória de aciaria constituída de silicatos e óxidos.

O processo de fabricação do aço na aciaria é considerado de alta tecnologia, com operações muito bem controladas, para que se obtenha um produto que satisfaça exigências muito rígidas do mercado consumidor. (SOUZA, 2007)

PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO

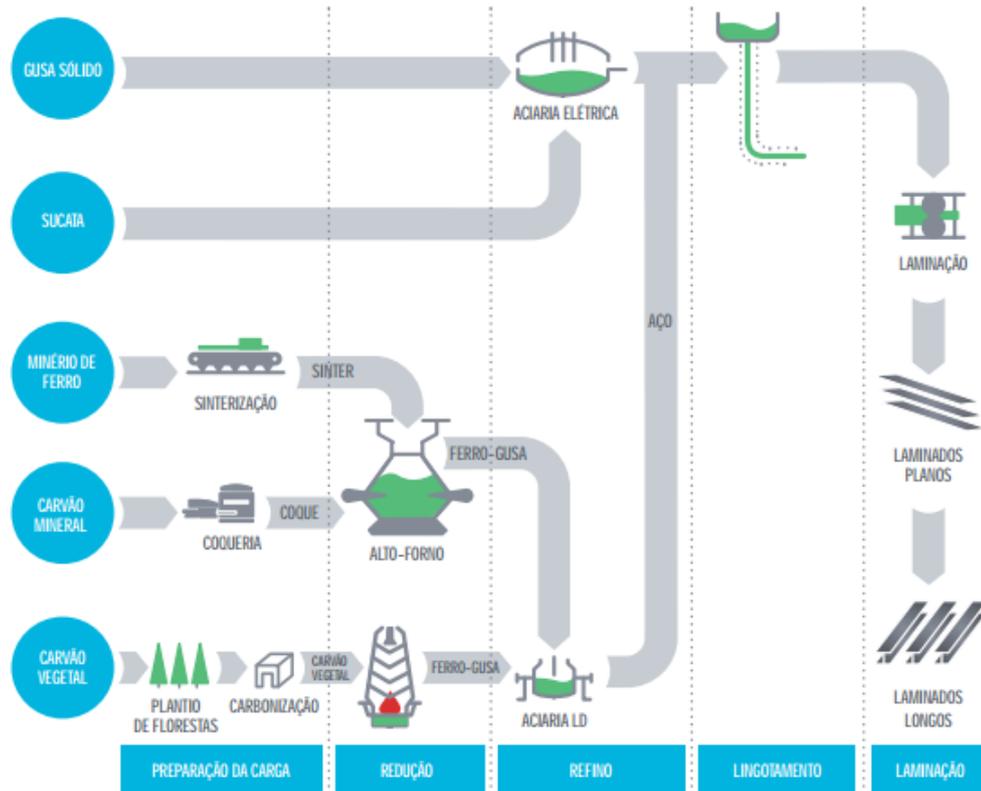


Figura 2.1: Esquema da produção de aço (IABr, 2014)

A escória de aciaria é normalmente vazada em uma panela e/ou descarregada em pátios ao ar livre. Após o resfriamento, essa é britada. Posteriormente é separada em granulometrias distintas, por meio de correias rolantes. Em geral, a escória de aciaria é processada, primariamente, no interior das siderurgias, para a recuperação da fração metálica, reutilizada na própria aciaria, ou na sinterização ou no alto-forno. Em média, essa recuperação corresponde a 30% da massa de escória descartada. A escória separada por bitolas tem outras utilizações como, por exemplo, na indústria da construção civil pesada, ou como fertilizantes e corretivo de solo. (GEYER, 2001).

Cerca de 70% da produção mundial de aço é obtida via rota integrada a coque, sendo o percentual restante produzido pela rota semi-integrada. No Brasil, 77% do aço provém da rota integrada e 23% da semi-integrada, cabendo destacar que cerca de 11% da produção de aço

pela rota integrada usa carvão vegetal em substituição ao coque (carvão mineral). (IABr, 2012)

A composição química geral para as escórias varia de acordo com o processo de produção e de acordo com o tipo de usina. A Tabela 2.1, abaixo apresenta a composição química típica dos diversos tipos de escória.

Tabela 2.1: Composição química das escórias

	CaO	FeO	SiO₂	Al₂O₃	MgO	MnO	S
Aciaria LD	40%	25%	10%	5%	5%	4%	0,1%
Aciaria elétrica	30%	40%	10%	5%	7%	4%	0,1%

Fonte: Belgo Grupo Arcelor (2006)

2.1.2. Produção de aço no Brasil e geração de rejeitos

O Brasil possui com 29 usinas siderúrgicas, pertencentes a 11 grupos empresariais; 10 estados integram o parque produtor nacional, embora a região sudeste tenha a maior parte da produção, com 22 usinas. Em 2012, o Brasil ocupou a nona posição no ranking mundial no setor, com participação de 2,2% na produção global e de 52,5% na América Latina. (IABr, 2013). Em 2013 produziu-se 34,2 milhões de toneladas de aço bruto, representando uma queda de 1% na produção em relação ao ano anterior. (IABr, 2014).

Em 2013, para cada tonelada de aço produzido foram gerados 594kg de coprodutos e resíduos representando um total de 17,7 milhões de toneladas de rejeitos. Desse total, as escórias de alto forno contribuíram com 37%; as escórias de aciaria com 29%; pós finos com 14%; lamas com 5%; e, outros materiais com 15% (IABr, 2014).

Embora tenha um volume de geração inferior ao da escória de alto-forno, a escória de aciaria, não é plenamente reaproveitada, em função de aspectos de caráter técnico, ambiental e econômico, tanto no Brasil, ou mesmo nos países do primeiro mundo. (ABM, 2008)

Quanto à destinação, a escória de aciaria pós-processada, apresenta, em quase todos os países inclusive o Brasil, parcela significativa sem quase nenhuma agregação de valor ou apenas estocagem e disposição. (RAMOS et al, 2015)

Ainda segundo os autores, na maioria dos países, as escórias de aciaria não alcançaram o mesmo nível de utilização econômica das escórias de alto forno, que atinge 95% na média

global contra apenas 50% para a escória de aciaria. Assim, visando conquistar mercado e a confiança dos setores potencialmente consumidores, as empresas siderúrgicas de alguns países estão desenvolvendo estudos mais aprofundados sobre as propriedades das escórias de aciaria em conjunto com entidades acadêmicas e centros de tecnologia.

2.1.3. *Expansibilidade das escórias de aciaria*

Rubio e Carretero (1991) relatam a instabilidade das escórias de aciaria como um fenômeno de hidratação da cal livre presente principalmente nas escórias novas. A quantidade de cal livre pode variar para distintas escórias entre 1 e 15%. A expansibilidade é maior em escórias com maior conteúdo de cal e aumenta com o aumento da temperatura. Machado (2000) citado por Rohde (2002), indica que a expansibilidade da escória de aciaria está relacionada principalmente com a hidratação da cal livre (CaO) e do periclásio (MgO) e à corrosão e oxidação do ferro metálico residual. Essas reações causam considerável aumento de volume em relação às dimensões originais, podendo levar à expansão destrutiva da escória.

Os óxidos de Cálcio (CaO) e Magnésio (MgO) livres presentes na composição química da escória de aciaria LD, ao longo do tempo envolvem reações de hidratação e carbonatação que resultam em expansão volumétrica da ordem de até 14%. (SILVA et al., 2002).

Os teores de cal livre e óxido de magnésio são os componentes mais importantes para a utilização das escórias na construção civil no que diz respeito à sua estabilidade volumétrica. Pois em contato com a água as fases minerais reagem formando hidróxidos. Dependendo da taxa de cal livre e/ou MgO livre esta reação provoca um aumento do volume da escória na sua maioria combinados com uma desintegração dos pedaços de escória e uma perda de força, tornando a estabilidade volumétrica um critério fundamental para a aplicação de escórias de aço como material de construção. (MOTZ e GEISELER, 2001).

De acordo com Branco (2004), o grau de instabilidade destes compostos depende do tamanho dos cristais. Os cristais pequenos hidratam-se rapidamente, enquanto cristais grandes são formados por um processo de resfriamento lento. A cal livre, quando hidratada forma o $\text{Ca}(\text{OH})_2$. O MgO quando reage com a água forma o hidróxido de magnésio ou brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Além das reações de hidratação, a reação de carbonatação, também é responsável pela expansão do material. Essas reações são mostradas nas Equações (2.1), (2.2) e (2.3).



Segundo Bensted et al. (1974) citado por Masuero (2004), o silicato dicálcico também apresenta grande importância no fenômeno da instabilidade da escória. O silicato dicálcico ($2CaO.SiO_2$) ocorre segundo quatro tipos estruturais:

- (a) α : estrutura trigonal
- (b) α' (bredigita): ortorrômbico
- (c) β (Iarnita): monoclinico
- (d) γ (calco-olivina): ortorrômbico

A forma α ocorre a temperaturas acima de $1420^\circ C$, quando as escórias estão no estado líquido. Com a queda de temperatura e ao atingir $670^\circ C$, o silicato bicálcico se transforma para a forma β que é instável e pode alterar-se para a modificação γ . Essa transformação é problemática, pois a transição de β para γ durante o resfriamento ou mesmo em temperaturas ambientes produz aumento de cerca de 12% de volume, causando o fenômeno de esfarelamento. (BENSTED et. al., 1974 apud MASUERO, 2004)

As escórias de aciaria possuem em sua composição grande quantidade de partículas ferrosas, o ferro metálico (Fe^0) pode aparecer sob a forma dos íons Fe^{+2} e Fe^{+3} após sofrer processos de corrosão e oxidação. (LEE E LEE, 1995) apud (ROHDE, 2002). Metha e Monteiro (1994), afirmam que a transformação de aço metálico em ferrugem é acompanhada de um aumento de volume, que dependendo do estado de oxidação, pode ser de até 600% do metal original. Acredita-se ainda que esse aumento de volume seja a causa principal da expansão e fissuração do concreto. A Tabela 2.2, mostra os produtos de hidratação formados nestas reações. (MACHADO, 2000)

Tabela 2.2: Produtos de hidratação

Reações	Formação	Produto
	$\text{Fe}^0 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$	Wüstita
Oxidação	$2 \text{Fe}^0 + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
	$3 \text{Fe}^0 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$	Magnetita
Corrosão	$\text{Fe}^{+2} + 2\text{OH} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$	Hidróxido Ferroso
	$4 \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{Fe}(\text{OH})_3$	Hidróxido Férrico

Dados experimentais obtidos da observação de matrizes de cimento produzidas com escórias de aciaria ricas em aço por Santos et. al. (2014) reforçam teoria da instabilidade proposta. Por outro lado, matrizes com reduzidos teores de metálicos apresentam-se estáveis e duráveis no tempo, fato que pode ser justificado pelo enclausuramento dos elementos expansivos CaO e MgO pela matriz de cimento Portland. Tendo em vista os problemas relacionados à expansão da escória de aciaria seu processamento é fundamental para que se transforme em coproduto, através de operações unitárias de resfriamento controlado, britagem, separação magnética, classificação granulométrica e estabilização volumétrica. (ABM, 2008)

2.1.4. *Processos de estabilização das escórias de aciaria*

A instabilidade volumétrica é o principal problema da utilização das escórias de aciaria como agregado na produção de concreto, uma vez que essa variação de volume pode causar fissuras, levando à degradação da matriz cimentícia. Métodos de tratamento como a refusão ou mistura da escória com material contendo sílica poderiam aliviar este problema. A desintegração causada pela transformação do silicato dicálcico poderia ser evitada pelo resfriamento brusco da escória ou pela mistura de fosfato ou borato. (VIKLUND-WHITE E YE, 1999 apud GRAFFITTI, 2002).

Considerando que as escórias estejam com reduzido teor de metálicos (JUNIOR et. al., 2011), os teores de cal e magnésio livres devem ser elencados como componentes mais importantes para a utilização de escórias de aço para fins de engenharia civil no que diz respeito à sua estabilidade volumétrica. De acordo com Machado (2000), citado por Branco (2004), para que o fenômeno de expansão das escórias não ocorra, deve ser conduzida uma pré-hidratação do material (cura), que pode ser realizada a céu aberto expondo a superfície do material ao contato com água. Este processo tem duração média de três a doze meses, a depender da composição química da escória.

2.2. Aderência aço-concreto

O concreto é um material que apresenta alta resistência à compressão, porém sua resistência à tração é baixa ($R^{\text{tração}} = R^{\text{compressão}}/10$). Por essa razão há a necessidade de se utilizar junto ao concreto um material com alta resistência à tração com o objetivo deste material, disposto convenientemente, resistir às tensões de tração atuantes. Esse terceiro material composto (concreto + barras de aço) recebe o nome de concreto armado, onde as barras absorvem as tensões de tração e o concreto absorve as tensões de compressão. Ainda assim, o conceito de concreto armado envolve o fenômeno da aderência, que é essencial e deve obrigatoriamente existir entre o concreto e a armadura, pois para a existência deste compósito é imprescindível que haja real solidarização entre os dois materiais (concreto + barras de aço), e, que o trabalho seja realizado de forma conjunta. (BASTOS, 2006)

2.2.1. Parcelas da aderência

A aderência é o fenômeno que promove a integração entre aço e concreto e ainda impede que haja escorregamento de uma barra de aço em relação ao concreto que a envolve. É o fato responsável pela solidarização entre o aço e o concreto, fazendo com que esses dois materiais trabalhem em conjunto. (PINHEIRO E MUZARDO, 2003).

Esquemáticamente, a aderência é composta por três parcelas: adesão, atrito e aderência mecânica.

2.2.1.1. Aderência por adesão

A adesão é constatada pela resistência à separação dos dois materiais. E em virtude das ligações físico-químicas que se estabelecem na interface dos dois materiais durante as reações de pega, surge certa resistência de adesão R_{b1} que se opõe à separação dos dois materiais, como mostra a Figura 2.2. (FUSCO, 1995).

Segundo Leonhardt e Monning (1977), o efeito da adesão depende também da rugosidade e limpeza da superfície das barras, esse efeito isoladamente não é suficiente para uma boa ligação e é facilmente destruído no caso de pequenos deslocamentos.

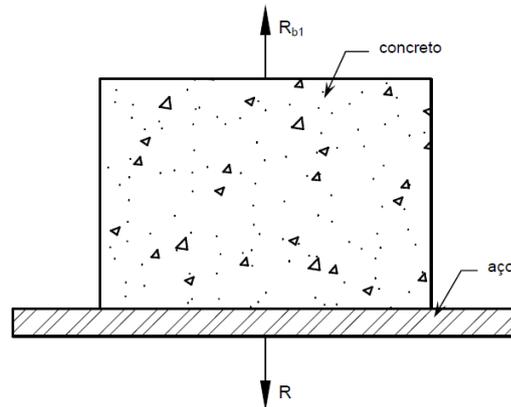


Figura 2.2: Aderência por adesão (FUSCO, 1995)

2.2.1.2. Aderência por atrito

A aderência também depende das forças de atrito entre os dois materiais, essas forças dependem do coeficiente de atrito entre o aço e o concreto, o qual é função da rugosidade superficial da barra e decorrem da existência de uma pressão transversal (P_t) exercida pelo concreto sobre a barra (Figura 2.3), e virtude de sua retração. (FUSCO, 1995)

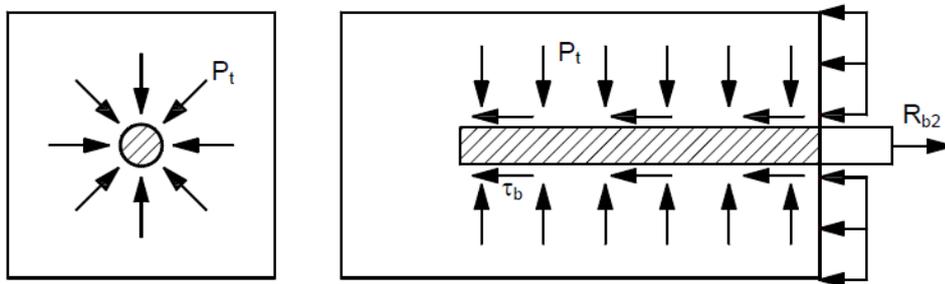


Figura 2.3: Aderência por atrito (FUSCO, 1995)

Segundo Leonhardt e Monning (1977) essas pressões transversais podem ser causadas por tensões de compressão transversais devidas às cargas, pela retração ou pela expansão do concreto.

2.2.1.3. Aderência mecânica

A outra parcela responsável pela aderência entre os dois materiais é a aderência mecânica. De acordo com Fusco (1995) esse tipo de aderência é devido à presença das nervuras das barras, essas saliências funcionam como peças de apoio mobilizando tensões de compressão, como mostra a Figura 2.4.

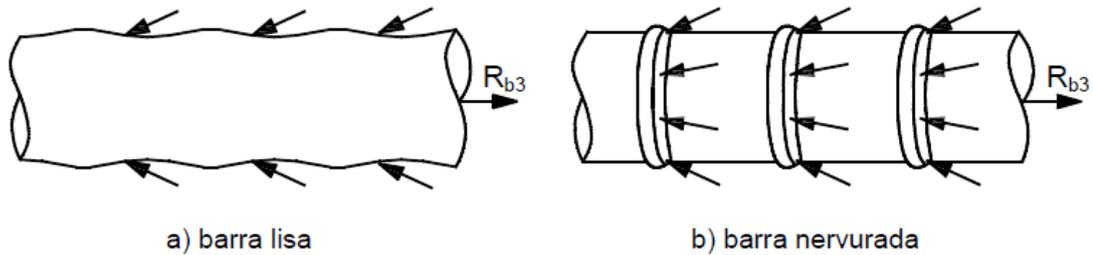


Figura 2.4: Aderência mecânica (FUSCO, 1995)

Nas barras de alta aderência as nervuras são dispostas de forma intencional ao longo da superfície da barra. A solidarização das barras ao concreto é baseada essencialmente neste tipo de aderência. As barras lisas também possuem esse tipo de aderência, uma vez que sua superfície apresenta irregularidades no processo de laminação.

De forma geral, quando uma barra começa a ser solicitada, a aderência inicialmente é mantida pelas forças coesivas provindas da adesão. Essa parcela, porém, é rapidamente consumida, seja devido a pequenos escorregamentos localizados, seja pela redução do diâmetro da armadura (efeito de Poisson), por conta do aumento da tensão. (DUMÊT, 2003)

A partir desse momento, passam então a agir as forças de atrito. No instante em que o concreto começa a fissurar, as forças de atrito vão sendo reduzidas e a aderência passa a ser função, praticamente, da aderência mecânica proveniente da irregularidade da superfície das barras. No caso das barras lisas, como a aderência mecânica não fornece parcela considerável, a barra vai perdendo a aderência à medida que vão sendo consumidas as forças de atrito. Esse processo leva, normalmente, a uma ruptura por arrancamento da barra.

No caso das barras nervuradas, como a aderência passa ser governada pela aderência mecânica, a partir do momento em que se verifica redução da contribuição da aderência por atrito, as nervuras agem como pontos de apoio de bielas comprimidas, que impedem o deslocamento relativo da barra. Em contrapartida, surgem tensões de tração perpendiculares às das bielas, que criam um anel de tensão ao redor da armadura, como mostra a Figura 2.5. (DUMÊT, 2003)

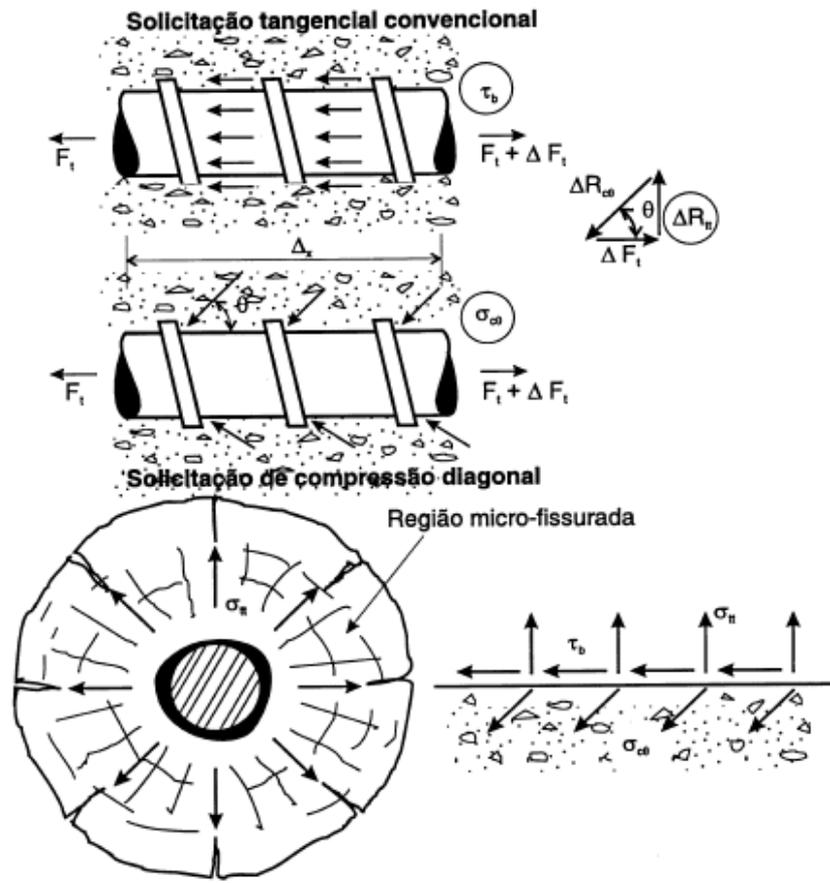


Figura 2.5: Transferência dos esforços de aderência (FUSCO, 1995)

2.2.2. Fatores que influenciam a aderência

O fenômeno da aderência entre o aço e o concreto é complexo e pode também ser influenciado por diversos fatores relacionados a esses dois materiais, como a resistência do concreto, propriedades do concreto no estado fresco, propriedades das barras, geometria da seção, tipo de carregamento, dentre outros.

2.2.2.1. Propriedades mecânicas do concreto

Quanto maior a resistência do concreto, melhor a aderência, já que as resistências do concreto à tração e à compressão são fatores intimamente ligados. Além da resistência, a qualidade da matriz cimentícia também interfere na aderência, pois acredita-se que quanto mais compacta e com menos vazios for a matriz, melhor será a aderência, porém este conceito ainda se encontra em discussão. (DUMÊT, 2003)

O aumento da capacidade do concreto em suportar ações ao redor da barra de aço aumenta a tensão máxima de aderência, pois o cone de fissuração que é formado ao redor da barra, devido ao efeito de arrancamento, estará mais resistente. (NETO, 2007).

Santana (2014) observou que quanto maior a resistência à compressão e a fragilidade do concreto, menores foram os deslizamentos observados. Segundo estudo realizado por Tojal (2011) constatou-se que a resistência do concreto está diretamente ligada a aderência armadura-concreto. Este resultado foi comprovado no ensaio de arrancamento onde à medida que a resistência do concreto cresce a tensão de aderência aumenta, confirmando o comportamento observado por diversos autores que através da redução da porosidade da zona de transição pasta/agregado e pasta/armadura principalmente pela introdução do fíler acontece um significativo ganho de aderência.

2.2.2.2. Condições da mistura no concreto fresco

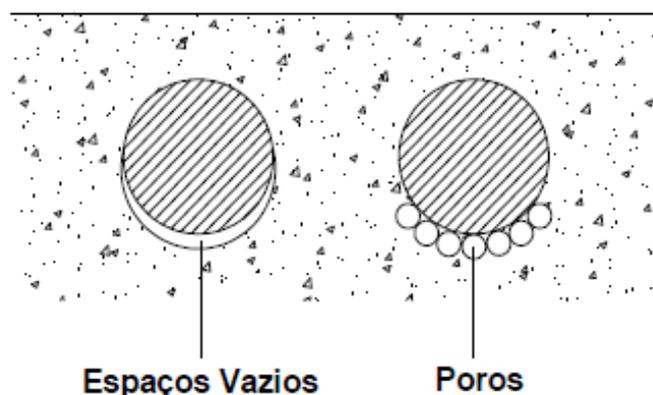
A homogeneidade e a estabilidade da mistura do concreto no estado fresco garantem uma igualdade nas condições de aderência ao longo da barra de aço e um melhor aproveitamento das propriedades do concreto endurecido. (NETO, 2007)

2.2.2.3. Adensamento do concreto fresco

Segundo Silva (2010), a deficiência do adensamento do concreto prejudica a aderência nas regiões de maiores concentrações de armaduras, pois são maiores as dificuldades de concretagem. Este fato possibilita o aparecimento de vazios, tornando esta região mais fraca quando solicitada, sobretudo quando se tratar de concretos com baixo teor de água/cimento.

2.2.2.4. Posição da concretagem

A posição das barras na seção concretada (horizontal ou vertical), assim como sua altura em relação ao fundo da fôrma é essencial para a qualidade da aderência. Devido a segregação do concreto fresco, pode observar-se um acúmulo de água sob as barras, que é absorvida mais tarde pelo concreto deixando vazios na parte inferior das barras, como apresentado na Figura 2.6.



**Figura 2.6: Formação de poros sob barras horizontais devido à segregação e acúmulo de água
(LEONHARDT E MONNING, 1977)**

Ribeiro (1985) citado por Silva (2010) afirma que as barras concretadas na posição horizontal no fundo da fôrma apresentam melhor comportamento do que aquelas concretadas no topo da fôrma. Isto se deve ao fato de que as barras inferiores se situam numa zona em que o adensamento é mais acentuado e, portanto, a existência de argamassa porosa na metade inferior das barras é menor.

A resistência à aderência pode ser reduzida à metade com relação às barras concretadas na posição vertical, porém essa diminuição depende do fator água/cimento e da altura das barras em relação ao fundo da forma. (LEONHARDT E MONNING, 1977)

2.2.2.5. Diâmetro das barras

O diâmetro das barras de aço afeta a área superficial de aderência Dumet (2003). O diâmetro da barra é diretamente proporcional à tensão de aderência, quanto menor o diâmetro da barra mais suscetível ela é ao arrancamento, já as barras com diâmetros superiores a 25mm estão mais propensas à ruptura por fendilhamento, pois quanto maior o diâmetro, maior será a área da barra e, conseqüentemente, maior será a tensão atuante, induzindo elevadas tensões radiais de tração.

Ducatti (1993) constatou que com o aumento do diâmetro da barra há um decréscimo da tensão última de aderência nos ensaios de arrancamento com carregamento monotônico. A possível justificativa para esse fato talvez seja a espessura da zona de transição, mais grossa nas barras de maior diâmetro, pois o maior diâmetro associado às maiores dimensões das nervuras retém mais água de amassamento na face inferior da barra proporcionando uma zona

de transição mais espessa enfraquecendo a ligação entre a matriz de argamassa e a armadura tornando-a mais porosa facilitando seu esmagamento por compressão pelas nervuras.

Nos ensaios de arrancamento realizados por Tojal (2011) com barras de 10mm e 16mm, observou-se que com o aumento do diâmetro da barra, há um aumento na carga última. Um dos fatores que influenciam neste resultado, é o fato de que as nervuras das barras de 16 mm são maiores que as nervuras das barras de 10 mm, criando assim regiões que trabalham como consoles, dificultando o movimento que se inicia entre a barra e o concreto, aumentando assim a aderência mecânica. Ainda segundo Tojal (2011), ocorreu um incremento na tensão de aderência com o aumento do diâmetro da barra, Barbosa (2001) afirma ainda que se ocorresse o contrário seria por deficiência no adensamento das peças, fato que influenciaria a zona de transição.

Segundo Santana (2014), o aumento do diâmetro da barra leva também ao aumento da tensão última de aderência. Com relação ao deslizamento último, de forma geral, o maior diâmetro da barra proporcionou maiores valores de deslizamento últimos. Com relação ao coeficiente de conformação, este é diretamente proporcional ao aumento do diâmetro da barra, segundo resultados obtidos por França (2004) e Barbosa (2001).

2.2.2.6. Espaçamento entre as barras e cobrimento do concreto

Segundo Dumêt (2003), quanto menor a distância entre as barras e menor o cobrimento é maior a probabilidade da peça sujeitar-se ao fendilhamento. A Figura 2.7 apresentada a seguir, ilustra alguns padrões de fissuração por fendilhamento que levam em consideração o cobrimento e a distância entre as barras onde: (a) cobrimento lateral e metade da distância entre as barras, menores que o cobrimento em relação à face inferior da peça; (b) Cobrimento lateral = cobrimento inferior, e ambos menores que metade da distância entre as barras; (c) cobrimento inferior menor que o cobrimento lateral e a metade da distância entre as barras. Para peças com grande cobrimento, a ruptura é menos comum, devido ao efeito de confinamento exercido pelo grande volume de concreto.

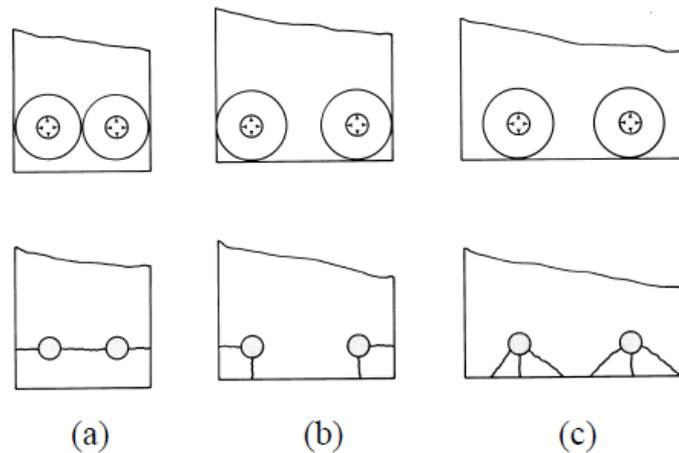


Figura 2.7: Fissuras de fendilhamento (MACGREGOR, 1988)

2.2.2.7. Formas e dimensões das nervuras

Segundo Leonhardt e Mönning (1977), em barras nervuradas, o valor da resistência por aderência mecânica depende da forma e da inclinação das nervuras, da altura e da distância entre elas. Ainda de acordo com os autores, G. Rehm descreveu esse fato e mostrou que a denominada superfície relativa f_R fornece uma medida de comparação utilizável para barras de perfis diferentes. Esta superfície nervurada relativa é a relação entre a superfície das nervuras (F_R), que é igual à área de contato dos consoles de concreto sobre as nervuras, e a superfície lateral (F_M) do cilindro de concreto a ser “cortado”, Figura 2.8.

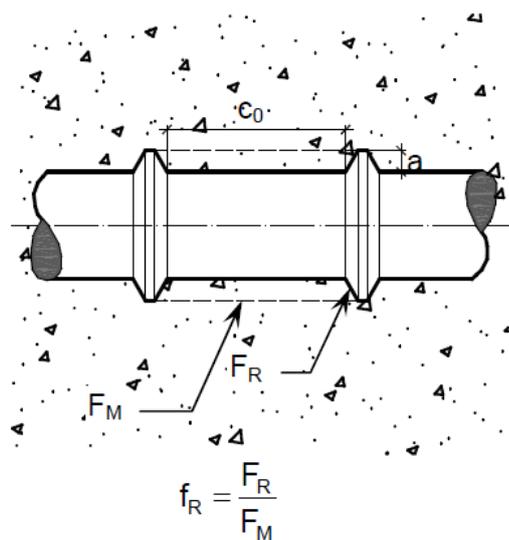


Figura 2.8: Representação da superfície da nervura e da superfície lateral (REHM, 1969 apud LEONHARDT E MÖNNIG, 1977)

O Instituto Americano do Concreto (ACI, 2003) estabelece um parâmetro que descreve a geometria da barra, esse parâmetro, chamado área relativa da nervura (R_r), considera a relação “Bearing area” e “Shearing area”, conforme, ilustrado na Figura 2.9, apresentada a seguir. A área relativa (R_t) é calculada de acordo com as Equações (2.4), (2.5) e (2.6).

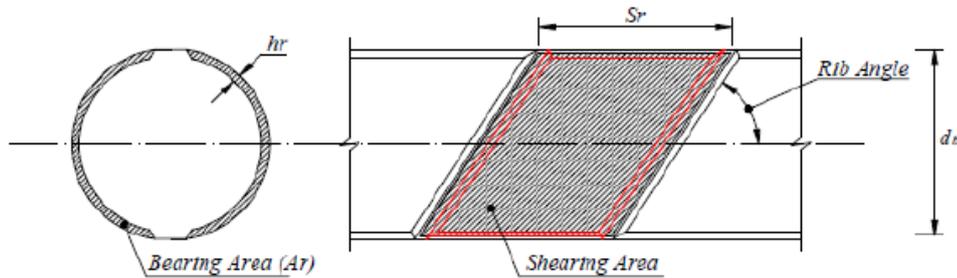


Figura 2.9: Esquema com os termos da fórmula da área relativa das nervuras (ACI, 2003)

$$R_t = \frac{\text{Bearing area}}{\text{Shearing area}} \approx \frac{h_r}{s_r} \quad (2.4)$$

$$\text{Bearing area} \approx h_r \pi d_b \quad (2.5)$$

$$\text{Shearing area} = \pi d_b s_r \quad (2.6)$$

2.2.2.8. Tratamento superficial do aço

O tratamento superficial do aço afeta a adesão e a resistência por atrito entre a barra de aço e o concreto. (NETO, 2007)

Barras de aço que apresentam uma superfície mais rugosa, como a provocada pela ferrugem, podem apresentar melhor aderência mecânica para essas armaduras, desde que não haja redução da seção resistente. Barras enferrujadas possuem melhor aderência quando comparadas com barras novas, no entanto este é um parâmetro difícil de quantificar, e que não é recomendável o uso intencional de barras oxidadas. (DUMÊT, 2003)

Resultados experimentais mostraram que a taxa de corrosão induzida em barras de aço e resistência a aderência entre barras corroídas e o concreto, eram dependentes de resistência do concreto e período de corrosão acelerada. Com o aumento da resistência do concreto de 20 para 46 MPa, a taxa de corrosão do aço envolvido pelo concreto diminuiu. O primeiro dia de corrosão acelerada da barra causou um ligeiro aumento na força de aderência, após 7 e 15 dias

de corrosão aceleração a resistência à aderência foi significativamente reduzida. (ABOSRRA et. al., 2011)

2.2.2.9. Tipo de carregamento

Para um mesmo deslizamento, o módulo da tensão de aderência para cargas de tração é bastante parecido com o módulo da tensão de aderência para cargas de compressão, consideradas tensões no aço abaixo da tensão de escoamento. Após o escoamento, o diâmetro da barra submetida à tração é notadamente reduzido devido ao efeito de Poisson, afetando consideravelmente a aderência. (NETO, 2007)

2.2.3. Modos de ruptura

Existem basicamente dois modos de ruptura pela perda de aderência: a ruptura por arrancamento e a ruptura por fendilhamento (DUMÊT, 2003). A Figura 2.10 apresentada a seguir, mostra o comportamento da tensão em função do escorregamento para os dois tipos de ruptura, onde (a) é a ruptura por arrancamento e (b) a ruptura por fendilhamento. Observa-se que a ruptura por arrancamento é mais dúctil que a ruptura por fendilhamento, e mobiliza uma tensão maior.

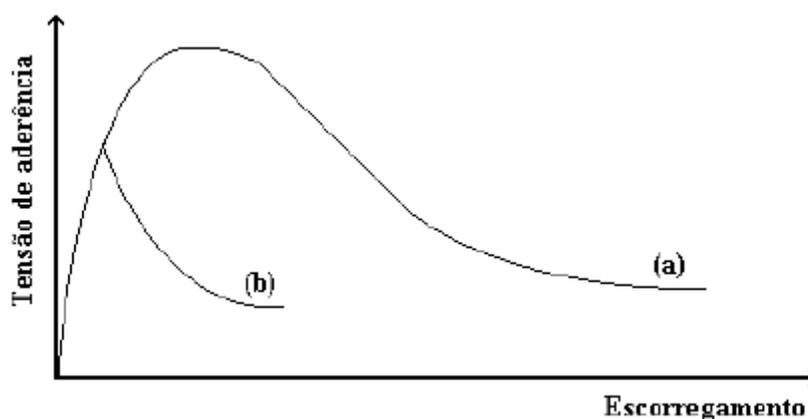


Figura 2.10: Curva tensão x escorregamento para modos de ruptura (DUMÊT, 2003)

A ruptura por arrancamento ocorre principalmente devido ao cisalhamento do concreto entre as nervuras e esse tipo de ruptura está principalmente relacionado à resistência do concreto e ao tipo e geometria das nervuras (CASTRO, 2002). No caso da ruptura por fendilhamento, os esforços de tração provocam o fendilhamento longitudinal do concreto circunvizinho à barra que tende a se propagar em direção às bordas. Quando a fissuração radial atinge a superfície

externa do elemento estrutural, a capacidade de aderência se esgota e rompe o cobrimento do concreto, como mostra a Figura 2.11.

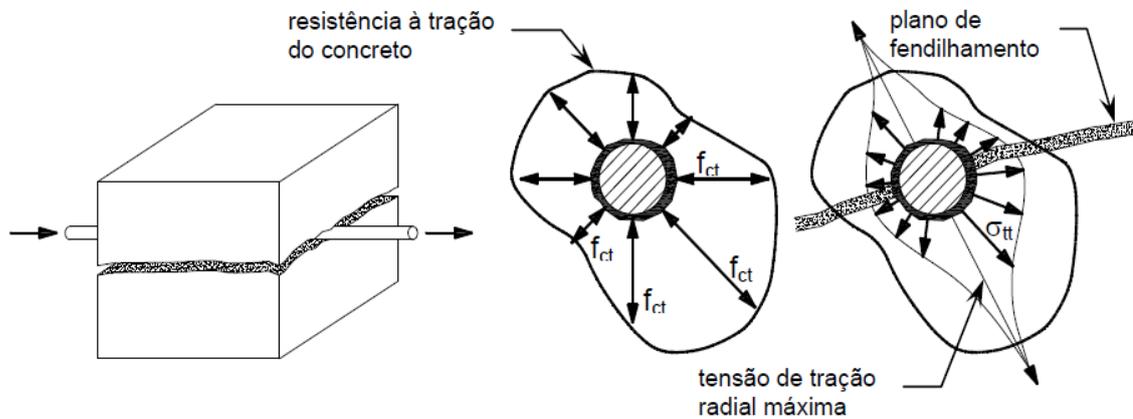


Figura 2.11: Fendilhamento longitudinal do concreto (FUSCO, 1995)

Esse tipo de ruptura ocorre de forma brusca e normalmente, sem aviso prévio, manifestando-se em situações onde a armadura não esteja confinada (CASTRO, 2002). “O plano de fendilhamento, que depende da orientação das fissuras, é influenciado pelo número de barras e suas configurações dentro do elemento. Em uma viga, por exemplo, o plano potencial é o paralelo ao eixo das barras devido ao fato de a tensão circunferencial de tração máxima atuar perpendicularmente ao eixo das barras. ”

Diversos fatores influenciam o modo de ruptura que a peça irá sofrer sendo eles: o tipo da armadura (barra, fio, cordoalha), o tipo de conformação superficial da armadura (lisa ou nervurada), o diâmetro da barra, a existência ou não de armaduras de confinamento, a distância entre barras de uma mesma camada, o cobrimento, a tensão na armadura, a qualidade do concreto, e a condição superficial da barra, entre outros. Esses são fatores que, obviamente, influenciam na aderência das peças de concreto armado. (DUMÊT, 2003)

2.2.4. Análise experimental

Para a realização dos ensaios de arrancamento é necessário que uma barra de aço esteja envolvida em um corpo de prova de concreto. Essa barra deve possuir determinado comprimento de aderência (l_v), e ao ser arrancada, devem ser determinados os deslocamentos dessa barra em relação ao concreto. O tamanho do corpo de prova, a posição e o comprimento de aderência são fatores que influenciam no resultado do ensaio.

O corpo de prova ilustrado na Figura 2.12a, apresentada a seguir, é inadequado visto que, a restrição à deformação transversal na placa de apoio e a compressão por efeito de arco, exercem uma compressão transversal sobre a barra, induzindo um acréscimo indesejável de aderência por atrito.

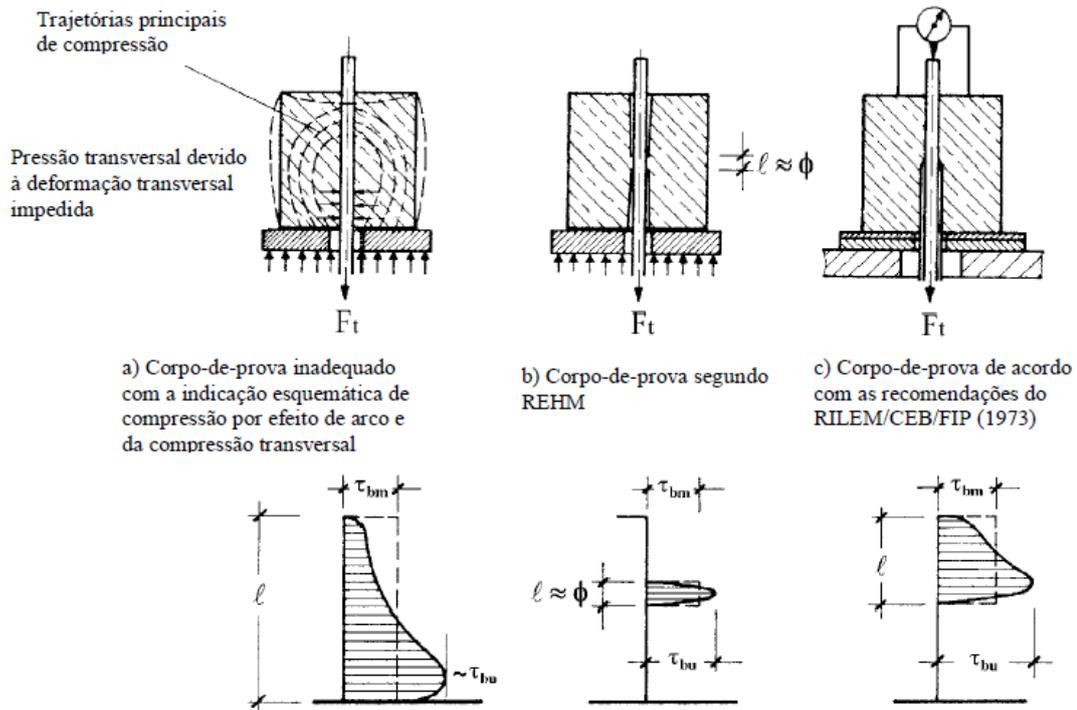


Figura 2.12: Corpos de prova para ensaio de arrancamento e as respectivas variações de tensão.

(LEONHARDT e MÖNNIG, 1977)

A fim de que sejam minimizados os efeitos do modelo experimental proposto na Figura 2.12 (a), utiliza-se um tubo plástico para garantir uma zona não aderente na face do corpo-de-prova que entra em contato com a placa de apoio como detalhado na Figura 2.13, pois a pressão lateral existente nesta área causa componentes que colaboram com a tensão de aderência, podendo superestimar o resultado.

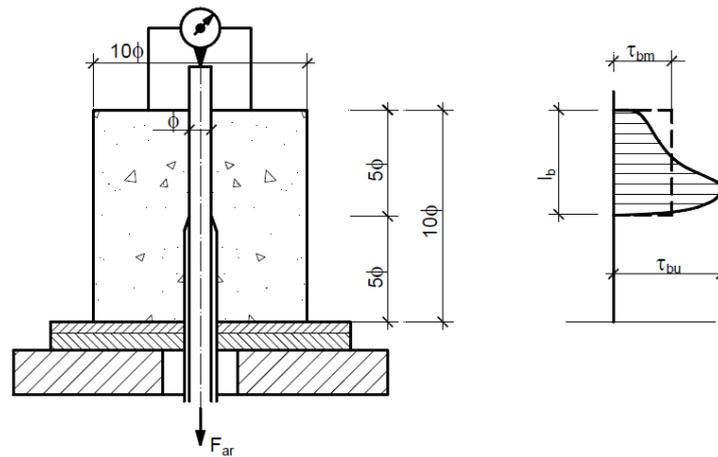


Figura 2.13: Detalhes do ensaio de aderência. (LEONHARDT e MÖNNIG, 1977)

2.2.4.1. Ensaio de arrancamento Pull-Out Test

O método de ensaio estabelecido pela RILEM – FIP – CEB (1983) é um dos mais conhecidos para determinação da tensão de aderência em concretos. Esse ensaio consiste basicamente do arrancamento de uma barra de aço concretada em um corpo de prova cúbico, com suas extremidades projetadas para fora da massa de concreto, conforme ilustrado a Figura 2.14.

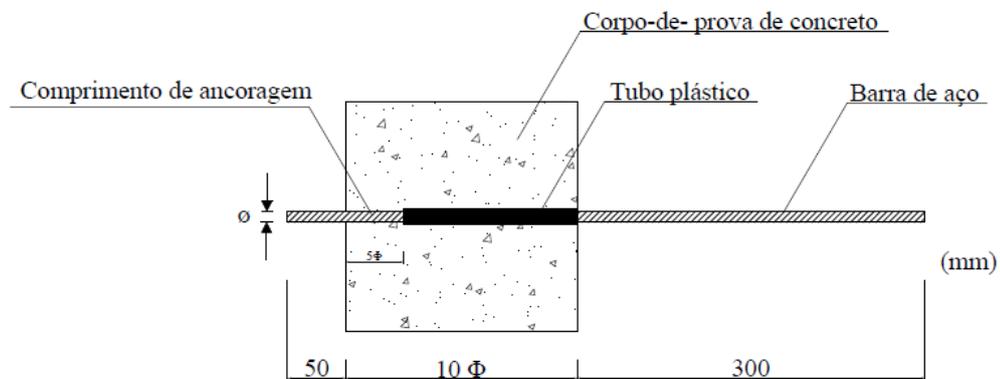


Figura 2.14: Corpo de prova - Pull-out test (RILEM RC 6, 1983)

A normalização Rilem RC 6 (1983) considera a seção transversal dos corpos de prova igual a 10ϕ para barras maiores de 20,0mm e 200 mm, para barras com diâmetro nominal igual ou inferior a 20,0 mm.

As reduzidas dimensões dos corpos de prova viabilizam a realização dos ensaios, no entanto não reproduzem de forma adequada tensões de aderência mais complexas, como aquelas observadas em vigas. (SILVA, 2010)

O corpo de prova é moldado com a barra na posição horizontal, e o adensamento do concreto feito com a utilização de vibrador de imersão. Este corpo de prova é desmoldado após 3 dias da concretagem.

2.2.4.2. Ensaio de arrancamento REHM Test

No teste de arrancamento utilizado por Rehm (1961), são utilizados corpos de prova cúbicos, onde são criados dois trechos não aderentes à barra nas extremidades do prisma, a parte aderente, localizada no centro do prisma, possui comprimento igual ao diâmetro da barra. A Figura 2.15 apresentada a seguir ilustra modelo do corpo de prova utilizado para a determinação.

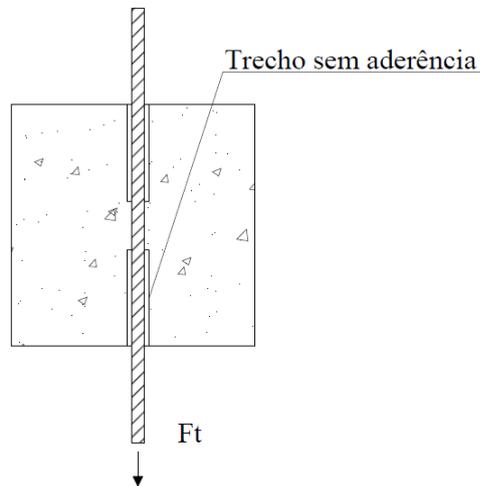


Figura 2.15: Modelo experimental (REHM, 1961)

2.2.4.3. Ensaio de flexão - Beam Test

O método de determinação de aderência conduzido a partir do ensaio de flexão - *Beam Test* mostra-se como o procedimento comparativamente melhor ao pull-out test, para determinação da capacidade de ancoragem de barras em vigas e avaliar variáveis como comprimento de ancoragem, diâmetro da barra, tipo de carregamento, variação de comprimento, presença ou não de armadura de confinamento, resistência à compressão e presença ou não de fibras. Como desvantagem, esse ensaio apresenta dificuldade de execução proporcionada pela complexidade da montagem e a dimensão dos elementos envolvidos. (SANTANA, 2014)

A RILEM RC 5 1983, prescreve o ensaio Tipo A, em que são ensaiadas barras de aço entre 10mm e 16 mm e, o Tipo B, para barras de aço entre 16 e 31 mm, como mostram a Figura 2.16 e a Figura 2.17.

O corpo de prova para este ensaio é constituído por dois blocos paralelepípedicos de concreto, interconectados pela parte inferior pela barra de aço a ser estudada e na parte superior por um perfil metálico que funciona como uma rótula. Esse corpo de prova é submetido à flexão através de duas forças aplicadas simetricamente em relação ao perfil metálico. Nas extremidades livres da barra são colocados deflectômetros a fim obter a medida do deslocamento dessa barra após cada incremento de força.

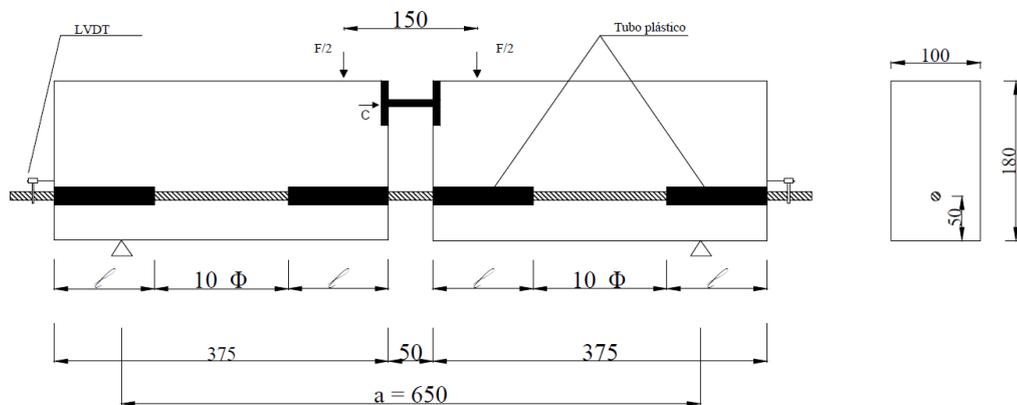


Figura 2.16: Modelo experimental: Tipo A (RILEM RC 5, 1983)

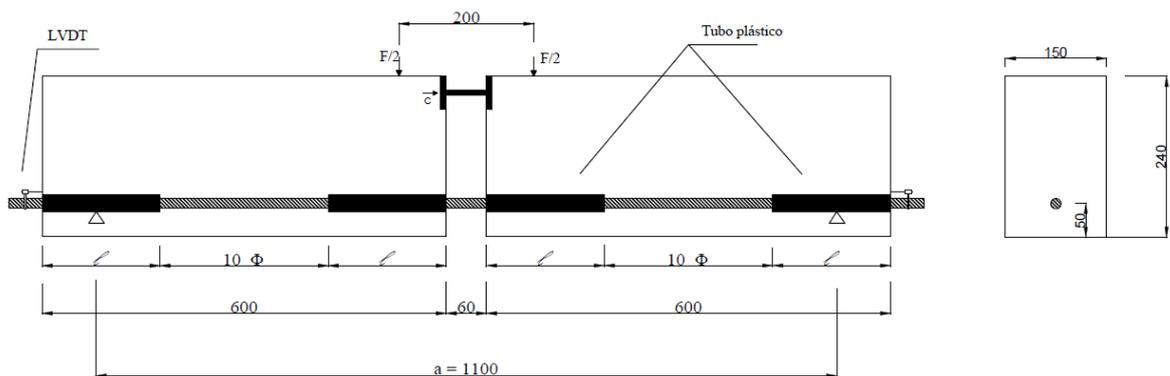


Figura 2.17: Modelo experimental: Tipo B (RILEM RC 5, 1983)

Para o modelo BEAM test, a tensão de aderência pode ser determinada em função das Equações (2.7) e (2.8), apresentadas a seguir.

$$\tau_b = \frac{R_{st}}{\pi \cdot \Phi \cdot l_b} \quad (2.7)$$

$$R_{st} = \frac{F}{4} \cdot \frac{a}{z} \quad (2.8)$$

Onde: T_b = tensão de aderência (MPa)

R_{st} é força de tração na armadura (N)

a é comprimento da viga

z é distância entre a resultante de tração e a resultante de compressão

Φ é diâmetro da barra (mm)

l_b é comprimento de ancoragem, igual a 10Φ (mm)

2.2.4.4. Ensaio de extremidade de viga - Beam end test

O método de determinação de aderência conduzido a partir do *Beam end test* consiste da tração de uma barra de aço contida no interior do corpo de prova, sob uma força vertical que simula a zona de compressão da viga. O movimento criado é equilibrado por outro par de forças que atuam na direção perpendicular à barra e simulam a reação de apoio e o esforço cortante que seria transmitido através do concreto, conforme observado à Figura 2.18, onde 1 é a força de tração na barra, 2 é a placa de reação que simula a zona de compressão de viga, 3 é a placa de reação de apoio e 4 é a placa de reação que simula o esforço cortante que seria transmitido através do concreto.

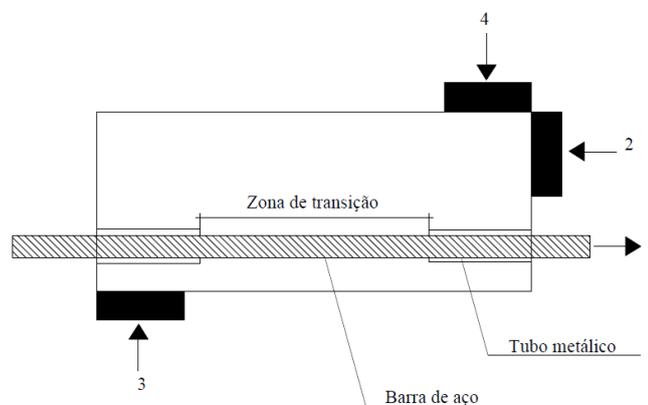


Figura 2.18: Modelo experimental – Beam end test (FRANÇA, 2004)

Esse método procura representar uma situação de aderência entre uma fissura devida a um flexo-cisalhamento considerando extremo da viga simplesmente apoiado. Esse método pode

ser considerado como uma evolução do tradicional ensaio de arrancamento Pull-Out Test por estabelecer um gradiente mais realista das deformações ao longo da altura do corpo de prova (FRANÇA, 2004).

2.2.4.5. Ensaio de arrancamento com anel circunferencial - Ring Pull-Out Test

O método de determinação de aderência conduzido a partir do RING PULL-OUT test, consiste da extração de uma barra de aço de um corpo de prova cilíndrico que se apoia sobre as placas da máquina de ensaio, como mostra a Figura 2.19. Esse corpo de prova é envolvido por um anel metálico dotado de extensômetros elétricos de resistência para captação das deformações do anel, da força de tração aplicada em um dos extremos de barra e os deslocamentos. A vantagem deste método é que ele permite medir diretamente a componente das forças de aderência que causam o fendilhamento. (FRANÇA, 2004)

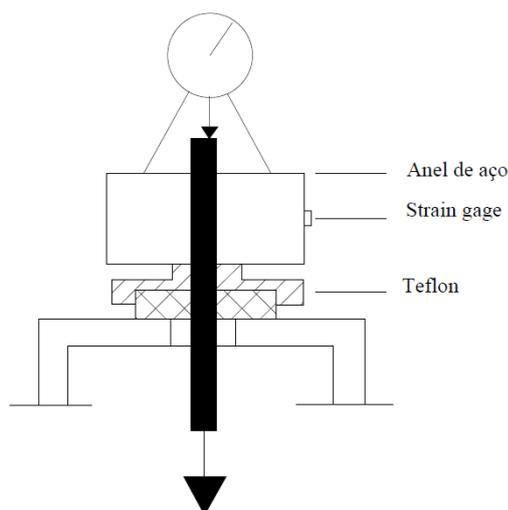


Figura 2.19: Ensaio de arrancamento com anel circunferencial (FRANÇA, 2004)

2.2.4.6. Ensaio das quatro barras

O método de determinação de aderência conduzido a partir do ensaio das quatro barras consiste da ligação de uma barra central a outras três barras, dispostas conforme ilustrado na Figura 2.20 apresentada a seguir.

As três barras dispostas sob os vértices de um triângulo são ligadas à barra central através de uma emenda por transpasse, imersas em um corpo de prova cilíndrico de concreto. Na execução do ensaio a barra central é tracionada e o cilindro de concreto é mantido imóvel pela

força das outras três barras. O principal objetivo deste ensaio é eliminar as interferências das tensões de compressão impostas ao concreto no ensaio de arrancamento tradicional. (CASTRO, 2002)

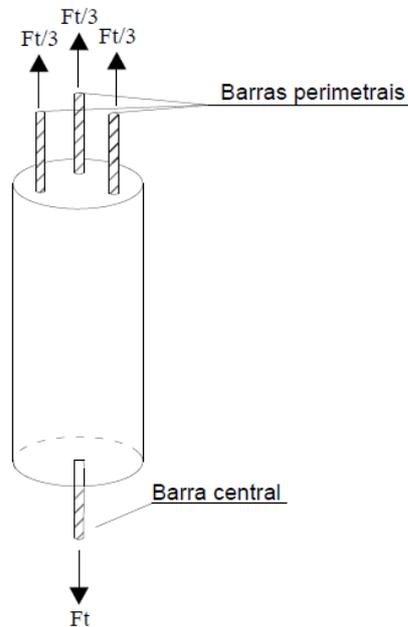


Figura 2.20: Corpo de prova para ensaio das quatro barras (CASTRO, 2002)

2.2.4.7. Conformação superficial – NBR 7477

A avaliação da aderência aço-concreto através da determinação do coeficiente de conformação superficial é obtido da tração de barras de aço com dimensões calculadas em função de um diâmetro conhecido, solidarizadas a corpos de prova de concreto conforme Figura 2.21. (NBR7477:1982)

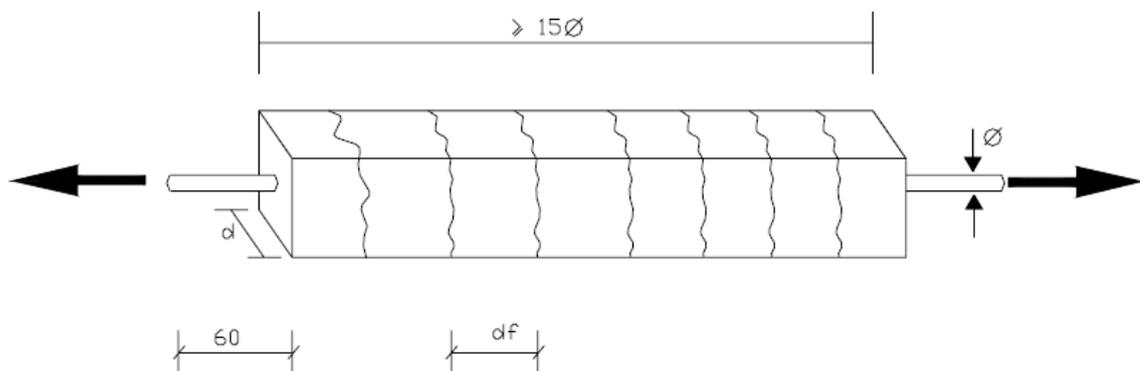


Figura 2.21: Ensaio de conformação superficial (NBR 7477, 1982)

2.2.5. Determinação da resistência à aderência

A normalização brasileira por meio da NBR 6118:2014, indica que para a determinação da resistência à aderência na ancoragem entre a armadura e o concreto deve ser obtida a partir da Equação (2.9), em que se consideram como parâmetros fundamentais os coeficientes de aderência para diferentes tipos de barras e apresentada a seguir;

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} \quad (2.9)$$

Onde:

$\eta_1 =$ coeficiente de aderência

$\eta_1 = 1,0$ para barras lisas
 $\eta_1 = 1,4$ para barras entalhadas
 $\eta_1 = 2,25$ para barras nervuradas

$\eta_2 =$ posição da armadura na concretagem

$\eta_2 = 1,0$ para situações de boa aderência
 $\eta_2 = 0,7$ para situações de má aderência

$\eta_3 =$ coeficiente relacionado ao diâmetro da barra

$\eta_3 = 1,0$ para $\phi < 32\text{mm}$
 $\eta_3 = (132 - \phi)/100$, para $\phi \geq 32\text{mm}$

ϕ é o diâmetro da barra (mm)

f_{ctd} = resistência a tração de cálculo do concreto

Consideram-se ainda, em boa situação de aderência os trechos das barras que estejam em uma das posições seguintes:

a) com inclinação maior que 45° sobre a horizontal;

b) horizontais ou com inclinação menor que 45° sobre a horizontal, desde que:

- Para elementos estruturais com $h < 60$ cm, localizados no máximo 30 cm acima da face inferior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima;
- Para elementos estruturais com $h \geq 60$ cm, localizados no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima.

Os trechos das barras em outras posições, e quando do uso de formas deslizantes, devem ser considerados em má situação quanto à aderência.

Para a determinação da tensão máxima de tração deve ser observado o valor característico inferior da resistência à tração calculada pela Equação (2.10):

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (2.10)$$

Para a falta de ensaios para a determinação dos valores de resistência a tração do concreto, a NBR 6118:2014 faculta a determinação segundo as Equações (2.11), (2.12), (2.13) e (2.14) apresentadas a seguir:

$$f_{ctk,inf} = 0,7f_{ct,m} \quad (2.11)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3f_{ct,m} \quad (2.12)$$

- Considerando concretos de classes até C50

$$f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{2/3} \quad (2.13)$$

- Considerando concretos de classes C55 até C90

$$f_{ct,m} = 2,12\ln(1 + 0,11 f_{ck}) \quad (2.14)$$

Onde: $f_{ct,m}$ e f_{ck} são expressos em megapascal (MPa)

Segundo CEB FIB 2010, a resistência à aderência é considerada como uma tensão média na superfície da barra sobre o comprimento de ancoragem l_b , e pode ser determinada conforme a Equação (2.15), apresentada a seguir, considerando todas barras com uma inclinação de 45° - 90° com a horizontal durante a concretagem:

$$f_{b,0} = \eta_1\eta_2\eta_3\eta_4 \left(\frac{\sqrt{\frac{f_{ck}}{20}}}{\gamma_c} \right) \quad (2.15)$$

Onde: η_1 = coeficiente relacionada à superfície da barra

- $\eta_1 = 0,9$ para barras lisas
- $\eta_1 = 1,1$ para barras recortadas
- $\eta_1 = 1,4$ para barras nervuradas revestidas com epóxi
- $\eta_1 = 1,8$ para barras nervuradas (incluindo barras galvanizadas e de aço inoxidável)

	$\eta_2 = 1,0$ para situações de boa aderência
$\eta_2 =$ posição da armadura na concretagem	$\eta_2 = 0,7$ para todos os outros casos quando as barras nervuradas são utilizadas
	$\eta_2 = 0,5$ quando se utilizam barras lisas
	$\eta_3 = 1,0$ para $\phi \leq 20\text{mm}$
$\eta_3 =$ coeficiente relacionado ao diâmetro da barra	$\eta_3 = (20/\phi)^{0,3}$ para $\phi > 20\text{mm}$
	$\eta_4 = 1,0$ para $f_{yk} = 500\text{MPa}$
	$\eta_4 = 1,2$ para $f_{yk} = 400\text{MPa}$
	$\eta_4 = 0,85$ para $f_{yk} = 600\text{MPa}$
$\eta_4 =$ coeficiente relacionado à resistência característica da armadura que está sendo ancorada	$\eta_4 = 0,75$ para $f_{yk} = 700\text{MPa}$
	ϕ é o diâmetro da barra (mm)
	f_{ctd} = resistência a tração de cálculo do concreto

- Todas as barras com uma inclinação de $45^\circ - 90^\circ$ com a horizontal durante a concretagem e
- Todas as barras com uma inclinação inferior a 45° com a horizontal, que são até 250 milímetros a partir do fundo ou, pelo menos, 300 mm do topo da camada de concreto durante a concretagem.

2.2.6. Modelos para curva tensão x deslizamento

2.2.6.1. CEB – FIB 2010

Segundo o CEB – FIB Model Code (2010), em condições bem definidas, é possível considerar que há uma média na relação 'Aderência Local' versus 'Deslizamento Local', para comprimentos de ancoragem de curta duração, estatisticamente aceitáveis.

Para carregamentos monotônicos a tensão de aderência entre o concreto e a armadura, para falha por arrancamento ou por fendilhamento, pode ser determinada em função do deslocamento relativo das barras de aço, de acordo com as Equações (2.16), (2.17), (2.18) e (2.19), apresentadas a seguir. A Figura 2.22 mostra a curva Tensão de aderência x Deslizamento.

$$\tau_0 = \tau_{max}(s/s_1)^\alpha \quad \text{para } 0 \leq s \leq s_1 \quad (2.16)$$

$$\tau_0 = \tau_{max} \quad \text{para } s_1 \leq s \leq s_2 \quad (2.17)$$

$$\tau_0 = \tau_{max}(\tau_{max} - \tau_f)(s - s_2)/(s_3 - s_2) \quad \text{para } s_2 \leq s \leq s_3 \quad (2.18)$$

$$\tau_f \quad \text{para } s_3 < s \quad (2.19)$$

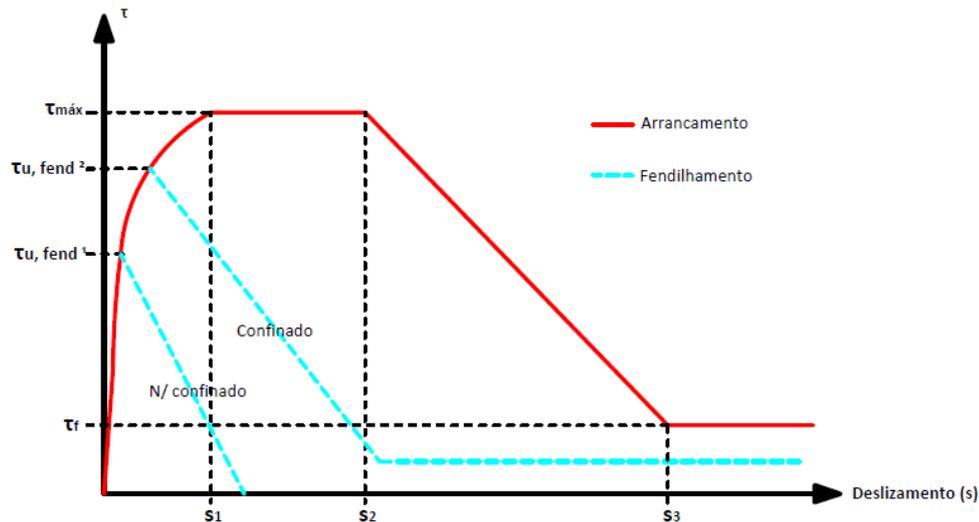


Figura 2.22: Curva Tensão de aderência x Deslizamento (CEB-FIB 2010)

Os parâmetros mostrados na Tabela 2.3 são utilizados nas expressões para o cálculo da tensão de aderência para barras nervuradas, nota-se que esses parâmetros variam de acordo com o tipo de ruptura, com as condições de aderência e com a condição de confinamento do concreto.

Tabela 2.3: Parâmetros para definição da relação Tensão de aderência x Deslizamento para barras nervuradas

	1		2		3		4		5		6	
	Arrancamento				Fendilhamento							
	$\varepsilon_s < \varepsilon_{s,y}$				$\varepsilon_s < \varepsilon_{s,y}$							
	Boa condição aderência		Outras condições		Boa condição				Outras condições			
					N/confinado		Confinado		N/confinado		Confinado	
τ_{max}	$2,5\sqrt{f_{ck}}$		$1,25\sqrt{f_{ck}}$		$7,0 \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0,25}$		$8,0 \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0,25}$		$5,0 \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0,25}$		$5,5 \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0,25}$	
s_1	1,0mm		1,8mm		$s(\tau_{máx})$		$s(\tau_{máx})$		$s(\tau_{máx})$		$s(\tau_{máx})$	
s_2	2,0mm		3,6mm		s_1		s_1		s_1		s_1	
s_3	c_c^*		c_c^*		$1,2 s_1$		$0,5c_c^*$		$1,2 s_1$		$0,5c_c^*$	
α	0,4		0,4		0,4		0,4		0,4		0,4	
τ_f	$0,40 \tau_{máx}$		$0,40 \tau_{máx}$		0		$0,40 \tau_{máx}$		0		$0,40 \tau_{máx}$	

* c_c é o espaçamento entre as nervuras

Os valores da Tabela 2.3, no caso de falha por aderência (colunas 1 e 2) são válidas para concreto confinado (cobertura de concreto $\geq 5\phi$, espaçamento entre as barras $\geq 10\phi$).

No caso de falha por fendilhamento (colunas 3 a 6), os valores da Tabela 2.3, são válidos para $\phi \leq 20\text{mm}$, $c_{\max}/c_{\min} = 2,0$; $c_{\min} = \emptyset$ e $K_{tr} = 2\%$ no caso de estribos.

$$\tau_{u, fend} = \eta_2 \cdot 6,54 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{20}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{20}{\phi}\right)^{0,20} \cdot \left[\left(\frac{c_{\min}}{\phi}\right)^{0,33} \cdot \left(\frac{c_{\max}}{c_{\min}}\right)^{0,10} + 8K_{tr}\right] \quad (2.20)$$

Onde: $\eta_2 = 1,0$ para boas condições de aderência

$\eta_2 = 0,7$ para todas as outras condições de aderência

f_{ck} é a resistência à compressão característica (N/mm²)

ϕ é o diâmetro da barra (mm)

$c_{\min} = \min\{c_x, c_y, c_{si}\}$

$c_{\max} = \max\{c_x, c_{si}\}$

e

$$K_{tr} = \frac{\eta_1 A_{sv}}{(\eta_b \phi s_v)} \quad (2.21)$$

Onde: η_1 é o número de ramos da armadura confinada na seção

A_{sv} é a área da seção transversal de um ramo de barra confinada (mm²)

s_v é o espaçamento longitudinal da armadura confinada (mm)

η_b é o número de barras

ϕ é o diâmetro da barra ou diâmetro da menos barra quanto existir mais de uma barra (mm)

2.2.6.2. Almeida FILHO (2006)

Almeida filho avaliou a resistência em concretos convencionais e em concretos auto adensáveis para as classes de resistência de 30 e 60MPa. Observou que a regressão

exponencial não é adequada para representar o comportamento da resistência à aderência (pré-pico e pós-pico) quando não se utiliza concreto de alta resistência à compressão, sendo utilizada somente na representação do pré-pico. Para a representação do comportamento da resistência de aderência com a inclusão do pós-pico, adotou-se uma regressão polinomial. A Tabela 2.4 mostra as expressões desenvolvidas (2.22), (2.23), (2.24) e (2.25) para simular o comportamento do pré-pico da resistência de aderência para o teste de arrancamento para concretos com classe de resistência C30.

Tabela 2.4: Regressões exponenciais de pré-pico dos modelos de arrancamento (C30)

Tipo de concreto	Diâmetro da barra	Regressão exponencial	
Concreto auto adensável	10mm	$\tau(s) = 14,289 - 12,636 \cdot e^{(-s/0,2198)}$	(2.22)
	16mm	$\tau(s) = 12,764 - 12,295 \cdot e^{(-s/0,368)}$	(2.23)
Concreto convencional	10mm	$\tau(s) = 11,522 - 10,138 \cdot e^{(-s/0,2552)}$	(2.24)
	16mm	$\tau(s) = 10,583 - 9,165 \cdot e^{(-s/0,3597)}$	(2.25)

2.2.6.3. Barbosa 2001

O modelo proposto por Barbosa (2001), para descrever o comportamento da curva Tensão de aderência x Deslizamento, foi baseada na análise estatística do resultado de 140 ensaios de arrancamento (Pull-Out) em concreto convencional $f_c \leq 50\text{MPa}$ e concreto de alta resistência $f_c > 50\text{MPa}$ com barras de diversos diâmetros (CORREIA, 2012). As Equações (2.26), (2.27) e (2.28) propostas neste modelo são apresentadas a seguir.

Para concretos com $f_c \leq 50\text{MPa}$:

$$\tau = 19,36 \cdot s^{0,51} \quad (2.26)$$

$$s_{max} = 0,25\phi^{0,48} \quad (2.27)$$

Também foram propostas equações para determinação da tensão máxima:

Para concretos convencionais

$$\tau_{max} = e^{0,05\phi} + e^{0,004f_c} + 4,35 \quad (2.28)$$

2.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young é um parâmetro mecânico que proporciona a medida de rigidez de um material e está associado com suas propriedades mecânicas, como tensão de escoamento, tensão de ruptura, temperatura de propagação de trincas, etc. É uma propriedade intrínseca dos materiais e depende da composição química, microestrutura e defeitos (poros e trincas). Tal módulo é uma das mais importantes propriedades elásticas do concreto para a análise dos impactos de manutenção e desempenho das estruturas de concreto e está intimamente relacionado com a propriedade da pasta de cimento, a rigidez dos agregados selecionados e o método de determinação do módulo. (ALMEIDA, 2012)

Esse módulo é dado pela declividade de um segmento de reta tangente à origem do diagrama tensão-deformação (σ - ϵ) ou pela declividade de um segmento de reta que passa pela origem e corta o mesmo diagrama no ponto correspondente a uma determinada tensão. (LEAL, 2012)

Segundo Araújo (2011), os tipos de modulo de deformação estático estão relacionados a diferentes planos de carga, e devem ser escolhidos de acordo com o interesse do ensaio. Os planos de carga podem ser:

- Módulo de elasticidade tangente inicial (E_0): dado pela declividade de uma reta traçada passando pela origem do diagrama tensão-deformação. É utilizado quando se requer caracterizar a deformabilidade do concreto submetido a baixas tensões.
- Módulo de elasticidade tangente em um ponto genérico (E_{tg}): dado pela declividade de uma reta tangente à curva tensão-deformação em qualquer ponto da mesma. É utilizado quando se requer simular estrutura previamente submetida a carregamentos e descarregamentos. Esses carregamentos e descarregamentos prévios podem ser aplicáveis, por exemplo, quando há a interesse na simulação de uma estrutura cuja carga acidental é grande em relação à carga permanente.
- Módulo de deformação secante (E_{sec}): dado pela declividade de uma reta traçada entre dois pontos da curva tensão-deformação, por exemplo, entre os pontos correspondentes a tensão de 0,5 MPa e 30% da tensão de ruptura. Neste caso, simula a estrutura durante seu primeiro carregamento.

A ABNT NBR 8522:2008 estabelece três métodos de determinação dos módulos de deformação longitudinal, que são mostrados graficamente na Figura 2.23:

- Módulo de elasticidade tangente inicial. No concreto, do ponto de vista prático de ensaio, devido à linearidade do trecho inicial do gráfico, corresponde ao módulo de elasticidade cordal entre 0,5 MPa e $0,3f_c$ e ao módulo de elasticidade secante a $0,3f_c$. Convenciona-se indicar este módulo de deformação por E_{ci} .
- Módulo de deformação secante a qualquer porcentagem de f_c . Em geral trabalha-se com o módulo cordal entre 0,5MPa e $0,4f_c$, que é equivalente ao módulo de elasticidade secante a $0,4 f_c$, pois esta é geralmente a tensão nas condições de serviço recomendadas nos códigos e normas de projeto de estruturas de concreto.
- Módulo de deformação cordal entre quaisquer intervalos de tensão ou deformação específica, mas do ponto de vista prático é pouco utilizado.

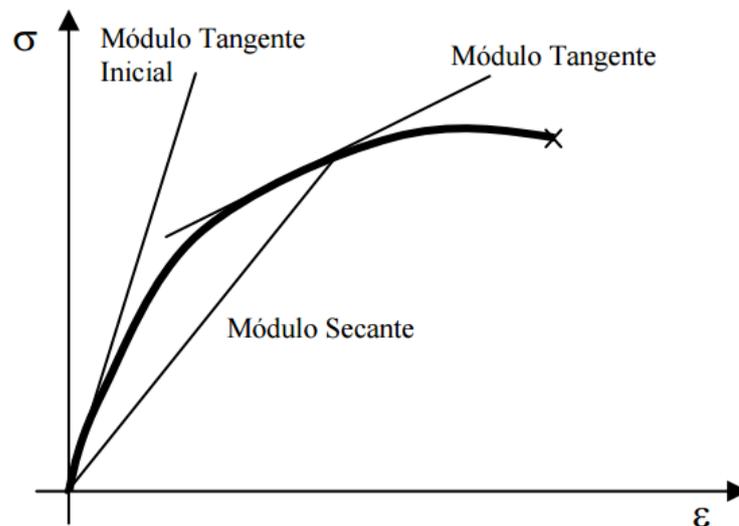


Figura 2.23: Tipos de módulo de elasticidade

Como o concreto não é um material homogêneo, mudanças na microestrutura, como aumento do volume de vazios ou da quantidade de microfissuras na zona de transição, podem exercer grande influência nas suas propriedades, principalmente na resistência e na deformabilidade. A rigidez do material composto não reflete totalmente a rigidez de cada um dos seus constituintes, tanto que o diagrama tensão-deformação do concreto fica compreendido entre os diagramas da pasta de cimento e do agregado, Figura 2.24. A não linearidade do diagrama tensão deformação do concreto é explicada pela presença da zona de transição e de suas microfissuras, que surgem mesmo em situações de serviço e levam à perda progressiva de rigidez. (ALMEIDA, 2005; METHA E MONTEIRO, 2008)

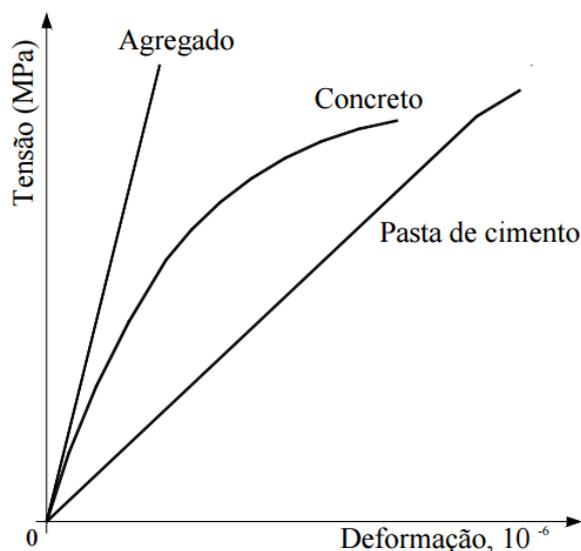


Figura 2.24: Comportamento tensão x deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto (ALMEIDA, 2005)

O módulo de elasticidade dinâmico é um método alternativo para a determinação da rigidez do concreto, é a medida do módulo através da determinação da frequência natural de vibração do material, obtida em ensaios de frequência ressonante. A ressonância é a tendência de um sistema mecânico de absorver mais energia quando a frequência de suas oscilações se igualam a frequência de vibração natural do sistema. O módulo assim obtido está relacionado ao comportamento elástico do concreto já que durante a vibração são aplicadas tensões muito baixas, medindo-se, portanto, deformações instantâneas muito pequenas. (NEVILLE, 1982)

No Brasil ainda não existe uma norma para determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Entretanto, a ABNT NBR 8802:1994 prescreve o método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente de concreto. Esta norma tem como principais aplicações à verificação da homogeneidade do concreto; a detecção de eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições; e o monitoramento de variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio (ataque químico), principalmente pela ação de sulfatos. Apesar desta normativa não ter como finalidade obter o módulo de elasticidade do material em estudo, ela auxilia na execução do ensaio. (BENETTI, 2012)

Capítulo 3: Materiais e métodos

O fluxograma apresentado a seguir na Figura 3.1, ilustra esquema proposto para metodologia aplicada.



Figura 3.1: Fluxograma da metodologia utilizada

Para utilização dos rejeitos de escória como agregados para a produção de matrizes de cimento Portland, foram necessárias ações de segregação gravimétrica e magnética, a fim de que se pudesse obter um agregado que fosse capaz de proporcionar matrizes duráveis para a produção do compósito concreto armado. A partir do processamento da escória, foram conduzidas caracterização dos agregados e das barras de aço; dimensionamento dos traços de concreto empregados nesse experimento, segundo classes de resistência C20 e C40, utilizando a metodologia ABCP. Posteriormente, os concretos foram produzidos em laboratório e moldados os corpos de prova necessários para a determinação das propriedades físicas e mecânicas e para os ensaios de aderência (Pull out test e conformação superficial).

3.1. Agregados Naturais

Para a produção das matrizes de cimento Portland, utilizadas como referência nesse experimento, foram utilizados como agregados miúdos, areia do Rio do Peixe, extraída em Ponte Nova (MG) e agregados de gnaiss extraídos em pedreira da região metropolitana de Ouro Preto, MG. Todos os materiais naturais foram caracterizados, segundo suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas.

3.2. Agregado artificial

O material utilizado para produção das matrizes cimentícias (concreto) empregadas neste trabalho é a escória de aciaria tipo LD que foi coletada no pátio de rejeitos de uma usina siderúrgica localizada na região sudeste do estado de Minas Gerais. A escória de aciaria foi coletada nas seguintes faixas granulométricas: 0-4,8mm; 4,8-9,5mm e 9,5-12,5mm, o material

foi estocado em pilhas no pátio do Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMC², Universidade Federal de Ouro Preto, conforme ilustrado na Figura 3.2, apresentada a seguir.



Figura 3.2: Escória de aciaria LD

Todas as amostras coletadas foram submetidas a processos de estabilização dos óxidos de cálcio e magnésio, através de ciclos de molhagem e revolvimento durante período de 12 meses.

3.3. Processamento da escória de aciaria

Amostras do material foram levadas ao Laboratório de Materiais de Construção para análise preliminar de composição granulométrica, teor de metálicos e FRX.

Os resultados obtidos mostraram que a pilha de escória com granulometria abaixo de 4,8mm apresentava grandes quantidades de material retido nas peneiras de 2,36 e 1,18mm fazendo com que a distribuição granulométrica estivesse fora dos limites utilizáveis estabelecidos pela NBR – 7211:2005, como mostrado na Figura 4.2, na seção de resultados. Com o objetivo de corrigir a granulometria do material utilizado, construíram-se duas peneiras com dimensões de (1,00 x 2,00)m com malha de aberturas de 2,4mm e 1,18mm, como mostra a Figura 3.3. O peneiramento foi realizado manualmente com as peneiras inclinadas de forma que amostra rolasse pela peneira. O material passante ficava depositado em uma lona localizada abaixo da peneira e o material retido era depositado em outra lona para evitar a contaminação do material.

A partir do peneiramento, a granulometria foi montada de forma a ficar contida nos limites utilizáveis. As porcentagens das frações utilizadas foram:

Material abaixo de 1,18mm: 74,60%

Material entre 1,18mm e 2,36mm: 11,35%

Material acima de 2,36mm: 14,05%



Figura 3.3: Peneiramento da escória

Para determinação da quantidade de material metálico ainda presente na escória, amostras do material foram passadas em um imã com tambor magnético modelo HF-Ø12"x12", com potência de Principal em torno de 1350 Gauss.

Neste equipamento, o material é introduzido no silo alimentador que despeja uma quantidade controlada de material na calha alimentadora que leva o material até o rolo magnético giratório através de vibração, como mostra a Figura 3.4. A vibração da calha alimentadora e a rotação do tambor magnético possuem controle de velocidade que deve ser ajustado para cada tipo de material e eficiência desejada. Desta forma, foram realizados vários testes e observou-se que o processamento mais eficiente ocorria quando o material era passado no imã 2 vezes.

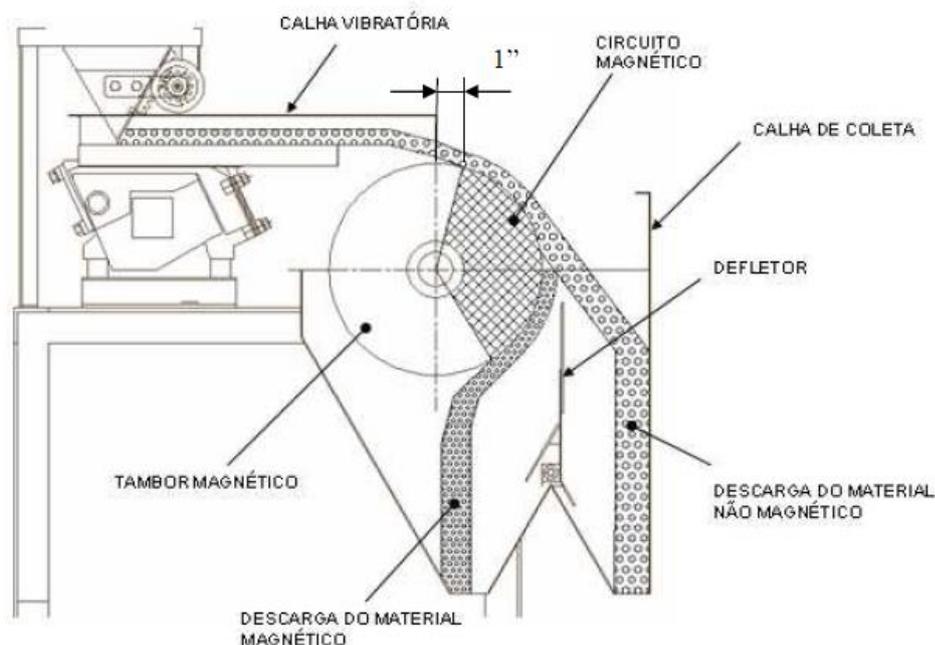


Figura 3.4: Princípio de funcionamento do tambor magnético (INBRAS)

3.4. Caracterização física dos agregados

As amostras coletadas na siderurgia foram retiradas dos pátios de forma representativa e de acordo com a NBR NM 27:2001. Foram transportadas até o LMC² 20,0 toneladas de material que constituíram amostra coletada. Para produção das matrizes de cimento Portland, foram coletadas das leiras 600kg de material, devidamente homogêneos e quarteados, mantidos em recipientes hermeticamente fechados.

Os agregados naturais e artificiais (escória de aciaria) utilizados na produção do concreto foram submetidos aos seguintes ensaios de caracterização: Análise granulométrica – NBR NM 248:2003; Massa específica dos agregados miúdos – NBR NM 52:2009; Massa específica dos agregados graúdos – NBR NM 53:2009; Massa unitária – NBR NM 45:2006; Material pulverulento – NBR NM 46:2003; Teor de umidade – NBR 9939:2011; Umidade superficial – NBR 9775:2011 e Absorção de água – NBR NM 30:2001.

Os agregados naturais e artificiais foram caracterizados segundo sua morfologia. Para identificação das características microscópicas desses materiais foram conduzidas análises morfológicas dos agregados com auxílio de estereoscópio modelo XTB-3AT, marca Coleman (Figura 3.5), com aumento de 45X. As imagens foram adquiridas de um sistema digital

modelo HDCE-50B, também da marca Coleman, a fim de que fossem identificadas propriedades morfológicas dos materiais como forma, rugosidade e distribuição dos grãos.



Figura 3.5: Estereoscópio

3.5. Caracterização química

Para a determinação da constituição química dos agregados naturais e artificiais utilizados, foram conduzidas análises químicas por fluorescência de raios X (FRX) – NanoLab – RedeMat/UFOP, equipamento da Shimadzu RayNy EDX-720 (Figura 3.6). As amostras utilizadas foram secas em estufa à 105°C por 24 horas, cominuídas em moinho Retsch PM100 de alta eficiência (Figura 3.7), durante 5 minutos a uma rotação de 300rpm.



Figura 3.6: Espectrômetro



Figura 3.7: Moinho de alta eficiência

3.6. Cimento

Para construção dos modelos experimentais, utilizou-se cimento CP V-ARI Fácil da HOLCIM, produzido de acordo com NBR 5733:1991. A Tabela 3.1 apresenta suas características.

Tabela 3.1: Características do cimento CP V-ARI Fácil da HOLCIM

Propriedade	Valor
Massa específica (g/cm³)	3,07
Área superficial (m²/g)	1,69
Início de pega (min)	127
Fim de pega (min)	182
Dimensão média (µm)	10,27
Perda ao fogo	3,60
Resistência Comp. 1 dia (MPa)	29
Resistência Comp. 3 dias (MPa)	40,1
Resistência Comp. 7 dias (MPa)	44,3
Resistência Comp. 28 dias (MPa)	53,2

Fonte: Fabricante

3.7. Barras

Para determinação das tensões de aderência nos modelos de matrizes propostos, utilizaram-se barras de aço tipo CA, superfície nervurada, Belgo 50S, com os diâmetros de 8,0mm; 10,0mm e 12,5mm, fornecidos pela ArcelorMittal.

3.8. Caracterização das barras

Para a caracterização das barras de aço tipo CA, foram extraídas amostras que representassem todo o material utilizado no planejamento experimental. Todas as barras foram caracterizadas segundo suas propriedades físicas (NBR 7480:2007) e elasto-mecânicas (NBR 7480:2007), como mostra a Figura 3.8.



Figura 3.8: Caracterização das barras tipo CA utilizadas

3.9. Dosagem do concreto

Para o modelo experimental proposto, foram consideradas classes de resistência C20 e C40. Com o objetivo de se obter valores próximos de resistências à compressão aos 28 dias para os concretos, utilizou-se metodologia de dosagem ABCP para agregados naturais e agregados de escória, em que se consideraram, prioritariamente, as características físicas destes agregados. A relação a/c de cada concreto foi obtida do dimensionamento e corrigida em função do slump, limitado em 80mm. Os valores obtidos para o dimensionamento de cada um dos traços empregados são mostrados na Tabela 4.3, na seção de resultados.

3.10. Produção dos concretos, moldagem e cura dos corpos de prova

Para o modelo experimental proposto padronizou-se método para a produção dos concretos (NBR 12821:2009), a fim de que as misturas no estado fresco pudessem exibir as mesmas condições de trabalhabilidade necessárias para moldagem dos corpos de prova (CPs). As dosagens foram produzidas em batelada, com carregamento do misturador orbital com todo agregado graúdo e 1/3 da massa de água de amassamento prevista em projeto; essa massa foi homogeneizada por 30s. Em seguida foram adicionadas toda a massa de cimento e 1/3 da massa de água; essa massa foi homogeneizada por 30s. Por último, foi adicionada massa do agregado miúdo em sua totalidade e 1/3 da massa de água; essa massa foi homogeneizada, até que se observasse formação de uma única fase para a mistura final.

A partir da matriz cimentícia homogeneizada, foram procedidos testes para determinação da trabalhabilidade, mensurada como abatimento do tronco de cone (SLUMP test), definido em 80mm (± 10 mm). Após verificação da consistência, foram moldados os corpos de prova.

Para a caracterização dos concretos C20 e C40 produzidos, foram moldados 04 (quatro) corpos de prova cilíndricos (100x200) mm, para cada dosagem, idade e tratamento estabelecidos. A moldagem desses corpos de prova foi realizada em camada única adensada em mesa vibratória (NBR 5738:2008), curadas em câmara úmida (NBR9479:94).



Figura 3.9: Moldagem dos cubos

Para a construção dos modelos cúbicos (200x200x200) mm utilizados no ensaio Pull Out, foram moldados CPs em 2 camadas, adensados por vibrador de imersão, como mostra a Figura 3.9. Os CPs utilizados para a determinação da conformação superficial também foram adensados em duas camadas.

3.11. Caracterização física do concreto

3.11.1. Propriedades no estado fresco

Para o concreto no estado fresco foram realizados ensaios de abatimento (NBR NM 67:1998), massa específica (NBR 9833:2008) e teor de ar incorporado pelo método pressométrico (NBR NM 47:2002). A Figura 3.10 mostra a realização do teste de slump, o equipamento utilizado para a determinação do teor de ar incorporado e a execução do ensaio de massa específica no estado fresco.



Figura 3.10: Caracterização do concreto no estado fresco

3.11.2. *Propriedades no estado endurecido*

3.11.2.1. **Absorção de água, índice de vazios e massa específica**

Para a determinação das propriedades do concreto no estado endurecido, definiu-se idade de 28 dias como referência para todos os tratamentos (NBR12821:2009). Foram determinados inicialmente a absorção de água, índices de vazios e massa específica (NBR9778:2005). Para as determinações, os CPs foram secos em estufa por 72h a fim de que fosse garantida a constância de massa (m_s), posteriormente acondicionados em água por mais 72h em imersão. Após esse período, os CPs foram acondicionados em recipiente adequado imersos em água sob fervura por 5 horas. Após fervura, sua massa foi determinada em condição de imersão

(m_i), em seguida os CPs tiveram sua superfície seca com pano úmido e determinada sua massa na condição saturado superfície seca (m_{sat}). As características como absorção de água, índice de vazios e massa específica foram determinadas conforme Equações (3.1), (3.2), (3.3), (3.4) e (3.5) indicadas a seguir.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.1)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (3.3)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (3.4)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (3.5)$$

Onde: m_s é a massa da amostra seca em estufa
 m_i é a massa da amostra saturada imersa em água
 m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura
 A é absorção de água (%)
 I_v é índice de vazios (%)
 ρ_s é massa específica da amostra seca
 ρ_{sat} é massa específica da amostra saturada após fervura
 ρ_r é massa específica real

3.12. Caracterização mecânica do concreto

Para a caracterização das propriedades elasto-mecânicas dos concretos NAT 20, NAT 40, ELD 20 e ELD 40, foram produzidos 04 (quatro) CPs para cada variável de interesse e conduzidas análises para determinação da resistência à compressão (NBR 5739:2007), tração por compressão diametral (NBR 7222:2011), módulo de elasticidade estático (NBR 8522:2008) e módulo de elasticidade dinâmico pela propagação de onda ultrassônica (NBR 8802:2013, ASTM C215-08); os resultados foram tratados segundo modelo estatístico apropriado (NBR 12655:1996).

3.12.1. Resistência à compressão, tração por compressão diametral

Para a melhor identificação do comportamento mecânico das dosagens ELD e NAT propostas, foram obtidos resultados para resistência à compressão axial para as idades de 3, 7 e 28 dias. Os corpos de prova utilizados foram mantidos em câmara úmida até a data de ensaio, capeados com enxofre e rompidos em seguida. A velocidade de aplicação de carga foi 0,45MPa/s até a ruptura do corpo de prova (NBR 5739:2007). A resistência à compressão foi dada pela Equação (3.6).

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (3.6)$$

Onde: f_c é resistência à compressão (MPa)
 F é força máxima alcançada (N)
 D é diâmetro do corpo de prova (mm)

Para determinação da resistência à tração por compressão diametral das dosagens ELD e NAT propostas, foram obtidos resultados para as idades de 3, 7 e 28 dias (NBR 7222:2011). A velocidade de aplicação de carga foi de carga 0,06MPa/s até a ruptura do corpo de prova. A resistência à tração por compressão diametral foi dada pela Equação (3.7).

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (3.7)$$

Onde: $f_{ct,sp}$ é a tração por compressão diametral (MPa)
 d é o diâmetro do corpo de prova (mm)
 l é o comprimento do corpo de prova (mm)
 F é a força de máxima obtida no ensaio (N)

3.12.2. Módulos de elasticidade

O módulo de elasticidade estático das dosagens ELD e NAT propostas, foi obtido por meio de resultados referentes a média de 04 (quatro) determinações (NBR 8522:2008). Os CPs foram submetidos a ciclos de carregamento e descarregamento e determinadas deformações específicas aos ciclos.

Para obtenção das deformações foi utilizado medidor de deformação elétrico resistivo unidirecional (strainage) modelo PA-06-800BA-120L, acoplado solidariamente por processo de colagem à superfície do corpo de prova e a aquisição de dados foi realizada com auxílio de um *datalogger* AGILENT modelo 34972A, conforme ilustrado na Figura 3.11.

Para a determinação do módulo de elasticidade estático optou-se pelo método da tensão fixa para a aplicação das cargas nos ciclos de carregamento. Nesse processo o corpo de prova é carregado até a tensão limite superior denominada σ_b definida como $0,3f_c$ e mantida por 60 segundos, seguido de um descarregamento até uma força próxima de 0,0MPa. Com o descarregamento, o CP é carregado novamente a uma tensão de 0,5MPa e mantida por 60 segundos. Foram realizados 4 ciclos de carregamento e descarregamento e em seguida cada um dos CPs tiveram um acréscimo de carga, à razão de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s até a ruptura.

O módulo de elasticidade estático (MPa) foi determinado pela Equação (3.8), apresentada seguir.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (3.8)$$

Onde: σ_b é a tensão maior ($\sigma_b = 0,3f_c$)
 0,5 é a tensão básica (MPa)
 ε_b é deformação específica média sob tensão maior
 ε_a é deformação específica média sob tensão básica (0,5MPa)

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, utilizou-se método fundamentado na velocidade de onda necessária para atravessar os corpos de prova de concreto (ASTM C597:2009). A determinação da velocidade de propagação de onda foi obtida por meio de um aparelho de ultrassom modelo TICO da marca PROCEQ, equipado com transdutores de 54kHz (NBR 8522:2008). Para cada bateria de ensaios foi realizada calibração do equipamento e em seguida aplicada camada de vaselina na superfície dos transdutores para garantir o melhor contato possível na interface entre transdutor e concreto, conforme ilustrado na Figura 3.12.



Figura 3.11: Detalhes do ensaio de módulo de elasticidade



Figura 3.12: Execução do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico (MPa), foi determinado pela Equação (3.9) (ASTM C597:2009) apresentada a seguir;

$$Ed = \rho V^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (3.9)$$

Onde: ρ é a massa específica (kg/m³)
 V = velocidade de onda (km/s)
 μ = coeficiente de Poisson

3.13. Aderência

3.13.1. *Pull-out test*

Para a determinação da aderência das barras de aço nos concretos ELD 20, ELD 40, NAT 20 e NAT 40, foram realizados ensaios de arrancamento segundo método RILEM/CEP/FIP RC6 – 1983. Neste ensaio, uma barra de aço tipo CA é fundida solidariamente em um corpo de prova cúbico de concreto ainda fresco. Aplica-se a esta barra, uma força de tração mantendo a outra extremidade livre de tensão. Durante o ensaio são obtidas a força de tração e o deslocamento relativo entre a barra de aço e o concreto.

Como as barras utilizadas neste projeto eram menores que 20,0mm, os corpos de prova cúbicos usados possuíam a dimensão mínima igual a 20cm de lado. O comprimento da zona aderente também varia em função do diâmetro da barra e equivale a um comprimento de 5ϕ . O comprimento da zona não aderente para as barras foi garantido com o isolamento da barra de aço tipo CA por um tubo PVC rígido de $\frac{1}{2}$ polegada fixado às barras de aço com o auxílio de fita isolante, conforme ilustrado a Figura 3.13.



Figura 3.13: Zona não aderente

Os corpos de prova foram apoiados em dispositivo especializado (placa de apoio - produzida especificamente para a determinação da tensão aderente), colocados na posição vertical sobre a placa de apoio, provida de uma cavidade central com abertura $2d$, conforme ilustrado na Figura 3.14.



Figura 3.14: Detalhe do dispositivo de apoio para CPs – placa de apoio

Os corpos de prova foram solicitados por uma força de tração (F), aplicada progressivamente até o escorregamento da barra na extremidade mais baixa (a mais longa), que representa a ruptura da aderência. O deslocamento da barra foi determinado pela leitura de um defleto metro eletrônico acoplado à barra na parte superior, conforme ilustrado na Figura 3.15 apresentada a seguir. O defleto metro utilizado foi o modelo EE05, da marca EMIC, com máxima deformação mensurável de 12,5mm e resolução de leitura de 0,001mm



Figura 3.15: Detalhe do dispositivo

A taxa de carregamento para a obtenção da tensão de aderência ao arrancamento foi determinada para cada diâmetro d (cm) das barras, mantendo constante o incremento da tensão. O valor para taxa de carregamento foi determinado de acordo com a Equação (3.10), apresentada a seguir.

$$v_p = 5d^2 \text{ (kp/s)} \quad (3.10)$$

O módulo do valor obtido para o arrancamento da barra, expresso em função da força F , foi convertido em tensão de aderência, considerando o comprimento de ancoragem utilizado para cada diâmetro de barra, de acordo com a Equação (3.11):

$$\tau_b = \frac{F}{\pi\phi L} \quad (3.11)$$

Onde: τ_b é a tensão de aderência (MPa)

F é a força de tração (N)

ϕ é o diâmetro da barra (mm)

L é comprimento aderente (mm)

O deslocamento das barras de aço tipo CA, ancoradas nos concretos ELD 20, ELD 40, NAT 20 e NAT 40, foi determinado para cada incremento de força, e os resultados plotados em um gráfico onde o deslocamento foi registrado em função da tensão de aderência pra cada uma das barras.

Para a determinação da tensão de aderência das barras de aço, foram utilizados 6 (seis) CPs para cada tratamento, tipo de concreto e tipo de barra e respectivos diâmetros, considerando idade de 28 dias para a determinação.

3.13.2. *Conformação superficial*

Para a determinação do coeficiente de conformação superficial para barras de aço tipo CA (NBR7480:1982), foram moldados corpos de prova de concreto ELD 20, ELD 40, NAT 20 e

NAT 40 com dimensões determinadas através das Equações (3.12), (3.13) e (3.14). As dimensões das fôrmas utilizadas são apresentadas na Tabela 3.2.

$$d = \sqrt{\pi\phi \left(\frac{\phi}{4} + 7 \right)} \quad (3.12)$$

$$l \geq 15d \quad (3.13)$$

$$L = l + 120 \quad (3.14)$$

Onde: d = lado do tirante, cm
 l = comprimento do tirante, cm
 L = comprimento da barra, cm
 ϕ = diâmetro nominal das barras, cm

O coeficiente de conformação superficial pode ser determinado pela Equação (3.15):

$$n = \frac{2,25 \times d}{\Delta l \text{ médio}} \quad (3.15)$$

Onde: n = coeficiente de conformação superficial
 d = lado da seção do tirante (cm)
 Δl = distancia média entre as fissuras (cm)

Tabela 3.2: Dimensões dos tirantes

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

As barras foram dispostas no centro de massa da seção transversal do tirante, com as extremidades expostas, a fim de que fossem aplicados os carregamentos (NBR7477:1982), conforme ilustrado à Figura 3.16, apresentada a seguir.



Figura 3.16: Fôrmas dos tirantes

O valor para o CCS foi obtido por meio da análise do padrão de fissuração dos tirantes compostos pelas barras tipo CA e por um revestimento de concreto, ensaiados aos 28 dias de idade, com carregamento equivalente a 80% da carga correspondente a tensão de escoamento de cada uma das barras tipo CA que compõem os modelos experimentais. Para cada determinação foram moldados 9 (nove) CPs, submetidos ao carregamento de tração e foram determinadas as distâncias entre as fissuras que se formaram, ao longo do eixo longitudinal do CP para as 4 (quatro) faces do tirante, conforme ilustrado à Figura 3.17, apresentada a seguir.



Figura 3.17: Execução do ensaio de conformação superficial

Capítulo 4: Resultados e discussão

4.1. Processamento da escória

As amostras utilizadas nesse experimento, submetidas a processo convencional de tratamento para a recuperação de metálicos, apresentaram teores significativos de óxidos de ferro magnéticos, conforme resultados apresentados na Figura 4.1, a seguir.

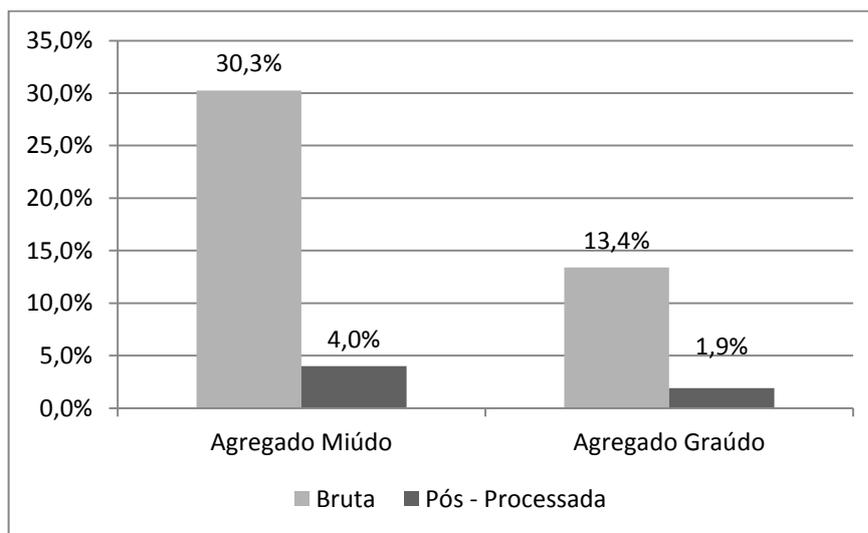


Figura 4.1: Teor de metálico das escórias

A fim de que os resultados pudessem aproximar-se dos limites indicados por Peixoto et. al. (2015), que recomendam limites de 2,5% para inclusões metálicas. Análises realizadas em amostras retidas no imã mostraram que para o agregado miúdo, 25% da amostra é material não metálico e para o agregado graúdo, este valor é aproximadamente 30%. Considerando então que os resultados obtidos da segregação magnética consideram óxidos totais, é possível afirmar que o conteúdo de material metálico nessa amostra é de 3,0% para agregados miúdos e 1,33% para agregados graúdos. Desta forma, o agregado miúdo de escória possui 0,5% de material metálico acima do recomendado acima, já o agregado graúdo atende a esse limite.

Após processos de segregação magnética, as escórias de aciaria (ELD) foram separadas segundo granulometrias ABNT, a fim de que se enquadrassem nos limites granulométricos estabelecidos pela normalização brasileira para agregados miúdos e graúdos.

4.2. Caracterização física dos agregados

4.2.1. Granulometria

Os materiais utilizados na produção dos concretos de referência (NAT 20, NAT 40) e nos concretos de escória (ELD 20, ELD 40) foram classificados segundo faixas ABNT 7211:2009¹, para agregados miúdos, conforme ilustrado na Figura 4.2, apresentada a seguir.

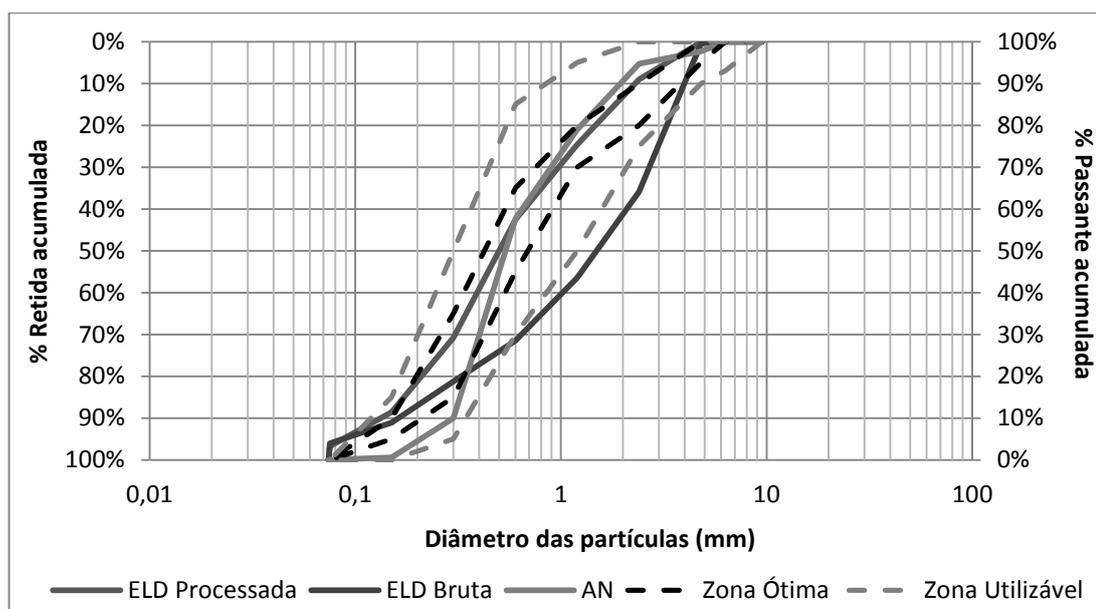


Figura 4.2: Distribuição granulométrica – Agregado miúdo

Observa-se que as escórias brutas devem passar por um processo de segregação a fim de que sua granulometria seja adaptada a padrões normativos mínimos. O processamento gravimétrico da escória de aciaria possibilita a construção de agregados com características granulométricas desejáveis, quase integralmente na faixa ótima de utilização. Esse processamento garante a produção de concretos mais trabalháveis, com menor consumo de cimento e com melhor desempenho mecânico.

Os limites granulométricos podem ser descritos em função da dimensão máxima característica (DMC) e do módulo de finura. A Figura 4.2, mostra os resultados de módulo de finura e DMC dos agregados. Verificam-se teores de materiais finos idênticos para todos os agregados, embora as areias obtidas do processamento da escória apresentem maior dimensão característica. Para os agregados graúdos, verifica-se maior DMC para os agregados naturais. Observa-se, ainda, que os grãos de escória apresentam maior higroscopicidade que os grãos

¹ De acordo com a NBR 7211: 2009, o módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

naturais. Dessa forma, a presença discreta de grãos de menores dimensões favorece o desempenho das matrizes no estado fresco. (PEIXOTO et. al., 2009).

Tabela 4.1: Dimensão máxima característica e módulo de finura

	Agregado miúdo			Agregado graúdo	
	ELD Processada	ELD Bruta	AN	ELD	BN
DMC	4,8	4,8	2,4	9,5	12,5
Módulo de Finura	2,36	3,37	2,60	5,82	5,87

A presença de grãos maiores pode induzir a um maior imbricamento dos agregados junto às barras de aço, podendo contribuir com maior tensão aderente. Entretanto, é preciso observar influência da área superficial na tensão aderente, dado maior ou menor teor de água necessário para garantir as mesmas características para os concretos no estado fresco. (METHA E MONTEIRO, 2014)

Os materiais utilizados na produção dos concretos de referência (NAT 20, NAT 40) e nos concretos de escória (ELD 20, ELD 40) foram classificados segundo faixas ABNT para agregados graúdos, conforme ilustrado na Figura 4.3, apresentada a seguir.

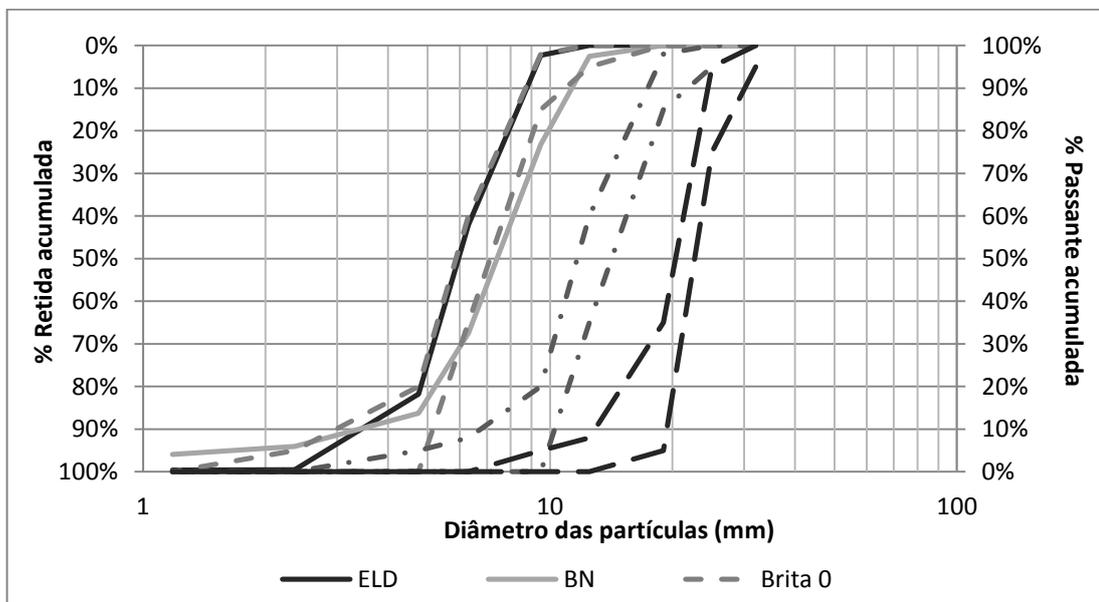


Figura 4.3: Distribuição granulométrica – Agregado graúdo

Os limites granulométricos obtidos para os materiais NAT e ELD indicam que, embora os materiais estejam no limite descrito pela faixa ABNT, a amostra ELD apresenta-se um pouco mais fina, como de fato observa-se segundo parâmetro DMC apresentado anteriormente. Um

menor DMC pode criar demandas relativas ao incremento do teor de água e redução da tensão aderente, como função da menor granulometria e do incremento de água.

4.2.2. *Massa específica e massa unitária*

Os resultados, obtidos para massa específica e massa unitária dos agregados utilizados na produção dos concretos NAT 20, NAT 40, ELD 20 e ELD 40, apresentam-se na Figura 4.4. Para todos os tratamentos, conforme observado por Souza et. al. (2014), Santos et. al. (2014) e Toffolo (2015), as escórias de aciaria apresentam maior densidade que os agregados naturais, função de presença de óxidos metálicos.

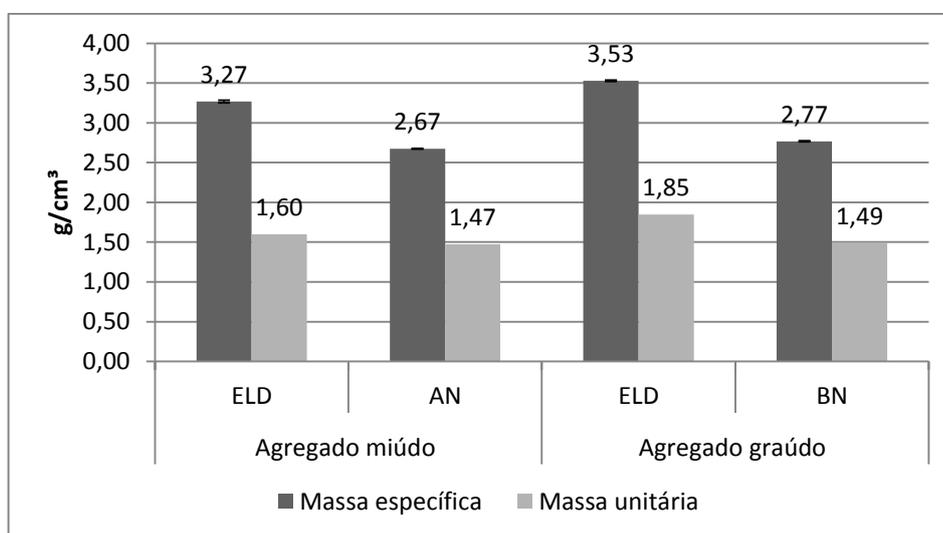


Figura 4.4: Massa específica e massa unitária

4.2.3. *Material pulverulento*

Os resultados, obtidos para presença de materiais pulverulentos dos agregados utilizados na produção dos concretos NAT 20, NAT 40, ELD 20 e ELD 40, apresentam-se na Figura 4.5. Os agregados miúdos utilizados na produção de concretos de cimento Portland, expostos a condições de desgaste superficial, devem conter no máximo 3% de materiais pulverulentos, enquanto demais concretos 5%. Para agregados graúdos, o limite é de 1%.

Os resultados obtidos indicam valores superiores aos limites admitidos. para a areia ELD e para a brita BN. Esses resultados podem influenciar nas propriedades dos concretos ELD e NAT em seu estado fresco e mesmo nas propriedades mecânicas destas matrizes endurecidas. Para adequação desses resultados seria necessária a lavagem desses agregados para retirada de

fração pulverulenta, porém, devido à grande quantidade de material necessário, esse procedimento é inviável. Agregados naturais da região de Ouro Preto apresentam, frequentemente, baixa qualidade.

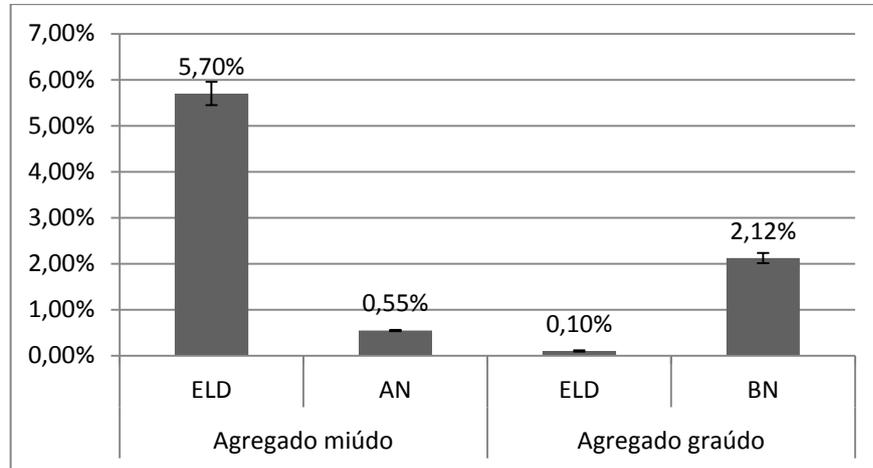


Figura 4.5: Material pulverulento

4.2.4. Umidade superficial, absorção de água e teor de umidade

A Figura 4.6 apresenta os resultados obtidos para umidade superficial e absorção de água dos agregados miúdos, bem como os teores de umidade dos agregados miúdos e graúdos.

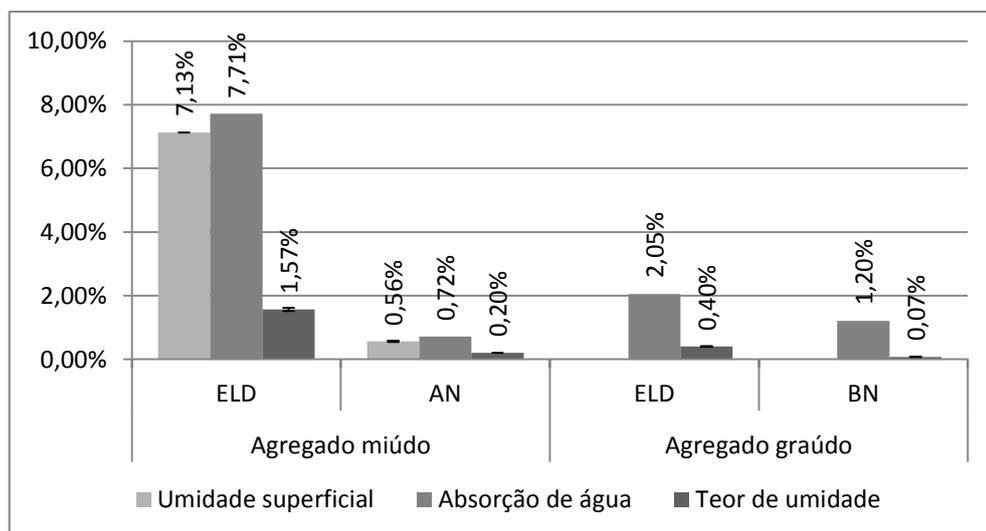


Figura 4.6: Umidade superficial, absorção de água e umidade

Observa-se que o agregado ELD apresenta maior umidade superficial e maior absorção de água que os agregados miúdos AN. A maior umidade superficial está relacionada a maior

presença de finos e conseqüentemente maior área superficial da amostra. Adicionalmente, a maior absorção de água relaciona-se à higroscopicidade dos agregados ELD, bem como, possivelmente, à morfologia dos grãos. O teor de umidade obtido ainda pode servir como parâmetro adicional a esta verificação.

4.2.5. *Morfologia dos grãos*

Os resultados obtidos para morfologia dos grãos dos agregados miúdos AN e ELD utilizados, apresentam-se na Figura 4.7.



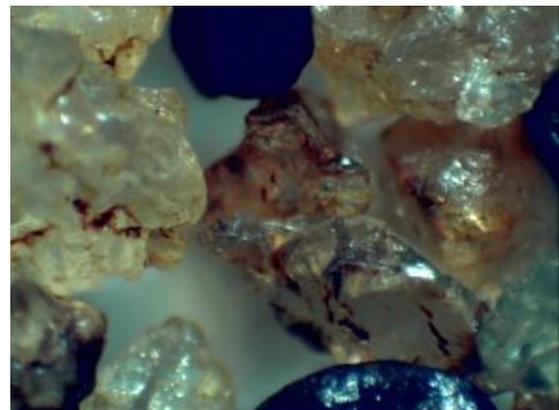
a) Agregado miúdo ELD



b) ELD Fração 600 µm



c) Agregado miúdo AN



d) AN Fração 600 µm

Figura 4.7: Morfologia do agregado miúdo – Aumento 45X

As características de um concreto são mais influenciadas pelas propriedades físicas dos agregados que compõem a matriz do que propriamente de suas propriedades químicas (Metha e Monteiro, 2014). Das imagens estereoscópicas, observa-se que os agregados miúdos ELD (Figura 4.7 (a) e (b)) possuem maior superfície específica e maior opacidade, o que sugere maior rugosidade; enquanto a superfície dos agregados miúdos AN (Figura 4.7 (c) e (d))

apresentam-se fechadas, mais homogêneas, brilhantes, o que sugere estrutura menos rugosa e, portanto, com menor absorção ou mesmo higroscopicidade, conforme observado das determinações para teor de umidade, absorção e umidade superficial. Por outro lado, agregados miúdos AN apresentam-se mais angulosos e menos volumétricos que os agregados miúdos ELD. Características como textura, rugosidade e formas arredondadas dos grãos podem contribuir de forma positiva para o desempenho das argamassas que compõem os concretos de cimento Portland.

As imagens dos grãos dos agregados graúdos BN e ELD apresentam-se na Figura 4.8.

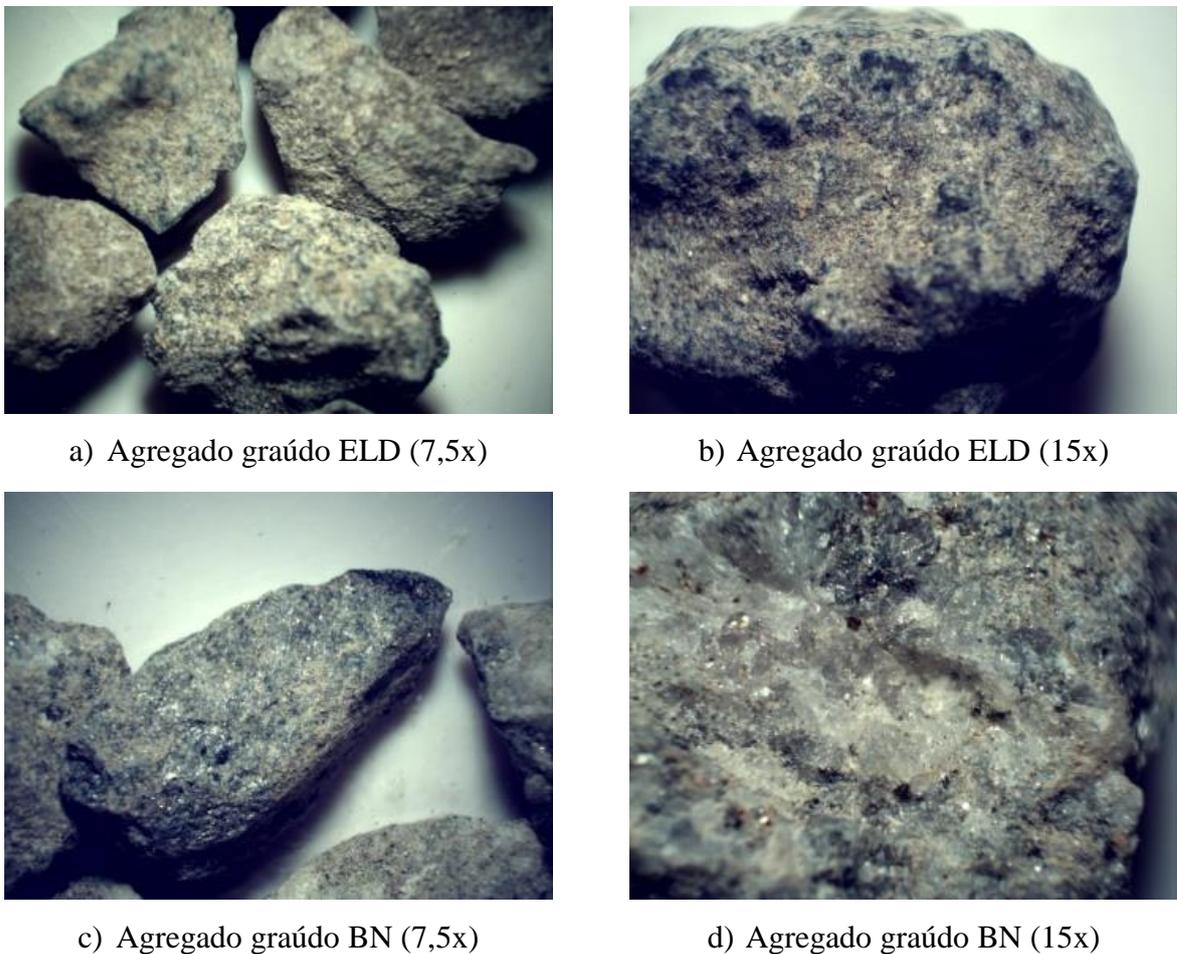


Figura 4.8: Morfologia agregado graúdo – Aumento 7,5x e 15X

Da forma similar às observações produzidas a partir das imagens estereoscópicas dos agregados miúdos, observa-se que os agregados graúdos ELD possuem também maior superfície específica e maior opacidade. Nessas imagens, pode-se de fato perceber uma rugosidade um pouco mais acentuada do que aquela observada para os agregados BN. Por outro lado, agregados graúdos BN apresentam-se menos volumétricos que os agregados

graúdos ELD. Observação já conduzida na análise granulométrica, onde se constata formas planas para os agregados naturais da região de Ouro Preto.

4.3. Caracterização química – Fluorescência de raios X

A Tabela 4.2, mostra os resultados obtidos para análise química por fluorescência de raios X das amostras de escória bruta (ELD_b) e da escória pós-processada (ELD_p).

Tabela 4.2: Composição química da escória

	ELD _b	ELD _p
CaO	40,1%	37,5%
Fe₂O₃	37,6%	22,3%
SiO₂	10,7%	26,1%
MnO	3,4%	2,4%
MgO	2,0%	-
Al₂O₃	1,9%	6,8%
SO₃	1,5%	2,7%
Cr₂O₃	1,2%	1,0%
TiO₂	-	0,5%

A caracterização por FRX mostra que o pós-processamento é capaz de reduzir o teor de Fe^T, de CaO, MnO e MgO presentes nas amostras, aumentando, por outro lado, a concentração de sílica nos agregados ELD.

4.4. Caracterização das barras

Os resultados obtidos para caracterização das barras de aço tipo CA relativamente à massa linear das barras são apresentados, a seguir, na Figura 4.9. Observa-se, de acordo com os dados obtidos, que todas as barras se apresentam em conformidade com limites estabelecidos pelos parâmetros normativos.

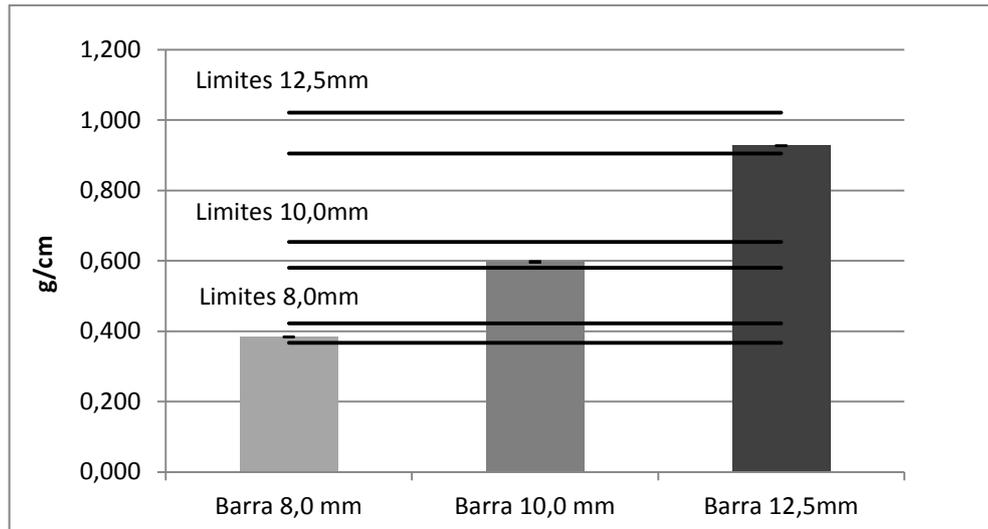


Figura 4.9: Variação para massa linear barras tipo CA

Os resultados obtidos para caracterização das barras de aço tipo CA relativamente às propriedades mecânicas das barras são apresentados, a seguir, na Figura 4.10. A tensão de escoamento e o limite de resistência para as barras consistem das propriedades de interesse estabelecidos como parâmetros normativos.

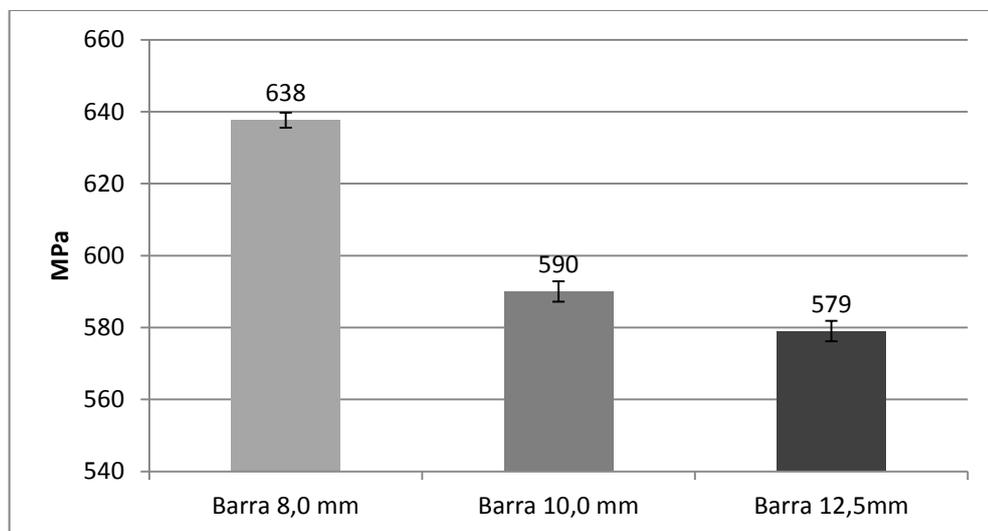


Figura 4.10: Tensão de escoamento

A resistência característica de escoamento para as barras do tipo CA-50 é de 500MPa. Os resultados obtidos para tensão de escoamento indicam comportamento superior aos limites normativos estabelecidos.

O limite de resistência parametrizado como valor característico correspondente a 1,08 da tensão de escoamento apresenta-se registrado no gráfico da Figura 4.11, apresentado a seguir.

Observa-se dos resultados obtidos que todas as amostras caracterizadas mecanicamente à tração apresentam tensões superiores às parametrizadas pela normalização.

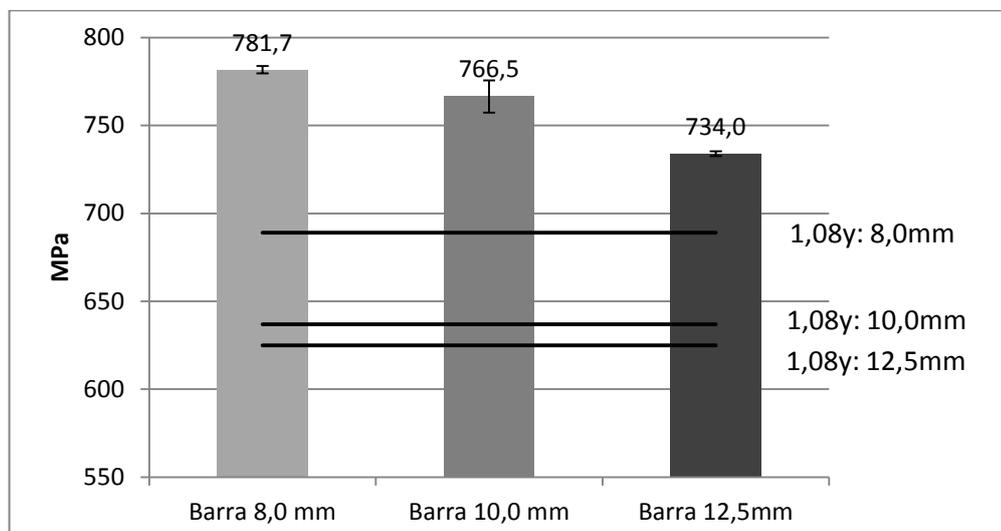


Figura 4.11: Tensão máxima

4.5. Propriedades do concreto – estado fresco

A composição obtida para dosagem considerou fator a/c como parâmetro de referência, bem como as características físicas de cada um dos agregados (ELD e NAT) utilizados. No entanto, para produção de traços que fossem idênticos no estado fresco, dado que o objetivo seria que as barras de aço tivessem as mesmas condições de aderência, foram necessários ajustes nos fatores A/C de projeto, a fim de que fossem produzidos concretos com mesmo SLUMP. Dessa forma, os fatores A/C reais foram ajustados, conforme se apresenta na Tabela 4.3, a seguir.

Tabela 4.3: Composição dos traços em massa

	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*

*considera-se como intervalo de validade, valores para SLUMP (80±10) mm

Os concretos ELD produzidos, embora apresentassem teores de ar incorporado ligeiramente superiores, conforme ilustrado na Figura 4.12 apresentada a seguir, alcançaram maiores massas específicas em seu estado fresco (Figura 4.13).

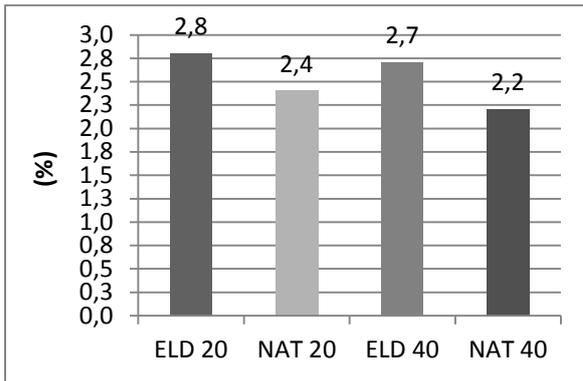


Figura 4.12: Teor de ar incorporado

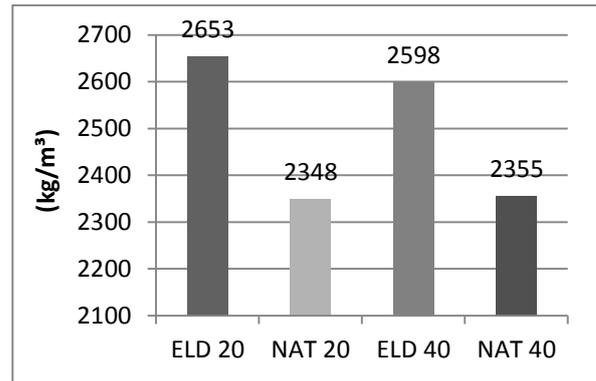


Figura 4.13: Massa específica - Estado fresco

A incorporação de ar pode estar também relacionada à forma dos grãos, assim como a maior massa específica diretamente relacionada à composição química e às características físicas dos agregados ELD.

4.6. Propriedades do concreto – estado endurecido

4.6.1. Absorção de água e índice de vazios

Os resultados obtidos para absorção de água e índice de vazios apresentam-se na Figura 4.14.

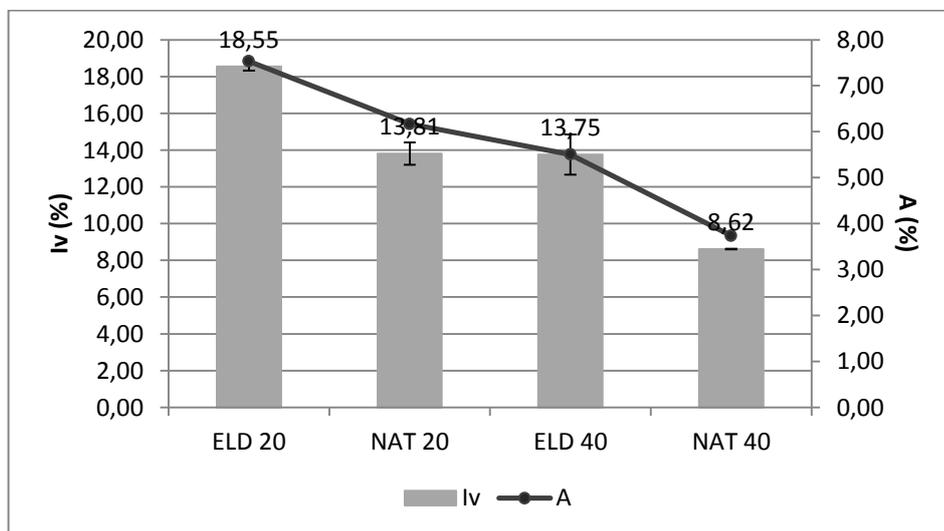


Figura 4.14: Absorção de água e Índice de vazios

Como função direta do aumento do fator A/C para obtenção das mesmas propriedades no estado fresco, os concretos ELD mostraram maior absorção de água que os concretos AN, para 20MPa e 40MPa. A mesma relação verifica-se para o índice de vazios. Esses dois parâmetros associados, podem indicar uma possível redução das propriedades mecânicas das dosagens em função do incremento do fator A/C. (NEVILLE, 2013)

Embora os parâmetros físicos relacionados a absorção de água e índice de vazios sejam uma boa aproximação para a determinação das propriedades mecânicas de uma matriz de cimento, o fator que realmente influencia a resistência do concreto é a distribuição e tamanho dos poros e não a porosidade total (Metha e Monteiro,2014). Essa distribuição é influenciada diretamente pela relação água/cimento e pelo grau de hidratação do cimento.

4.6.2. *Massa específica*

Os resultados para massa específica do concreto no estado endurecido apresentam-se na Figura 4.15. Os resultados obtidos indicam ser o concreto ELD mais denso que o concreto NAT e, embora a massa específica decresça com o aumento do teor de cimento, reduzem também a absorção de água e o índice de vazios. Essa observação está relacionada apenas com a redução da massa de agregados na dosagem. Todos os concretos, ELD e NAT podem ser classificados como normais em relação à massa específica.

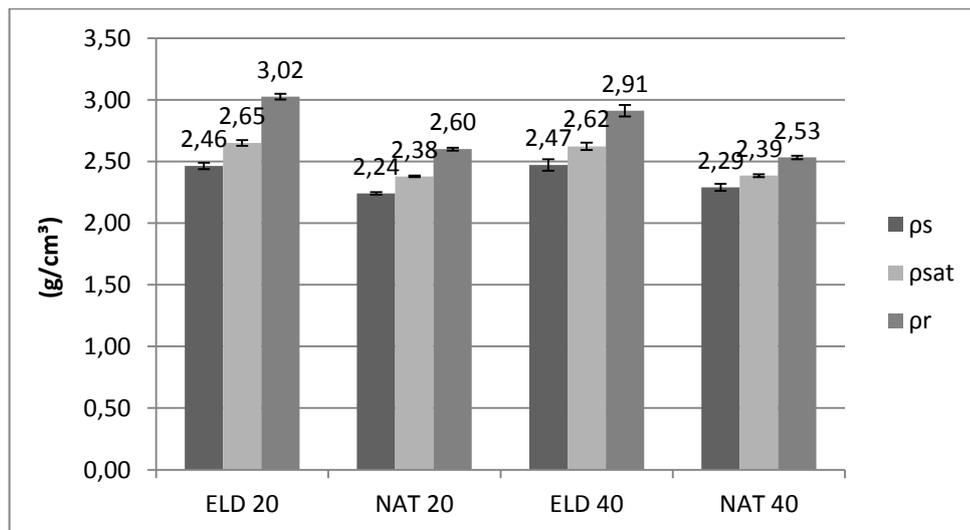


Figura 4.15: Massa específica - Estado endurecido

4.6.3. *Resistência à compressão e tração por compressão diametral*

A Figura 4.16, apresentada a seguir, mostra os resultados obtidos para a resistência à compressão simples. Considerando que os concretos foram produzidos com cimento CPV-ARI, observa-se aos 3 dias que as dosagens ELD 20 e ELD 40 apresentaram melhor desempenho mecânico relativamente à resistência à compressão, com uma resistência em

torno de 20% superior ao concreto NAT 20. Para idades de 28 dias, não se verificaram diferenças.

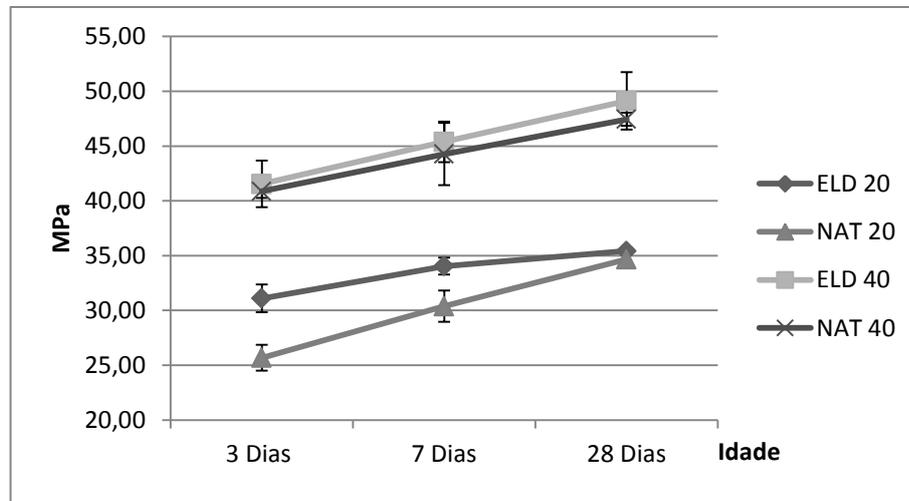


Figura 4.16: Resistência à compressão

Embora dosagens ELD 20 e ELD 40 apresentassem maior fator A/C, maior absorção de água, maior índice de vazios, e mesmo maiores teores de ar incorporado, registra-se melhor desempenho para essas matrizes. Justifica-se essa observação pelo fato de que os grãos dos agregados ELD apresentam-se mais volumétricos que os agregados AN, que por sua vez apresentam grãos predominantemente planos.

As observações conduzidas para a resistência à compressão dos tratamentos ELD e NAT, apresentam-se para resistência à tração, de forma idêntica, proporcionalmente, conforme pode-se observar da Figura 4.17, apresentada a seguir.

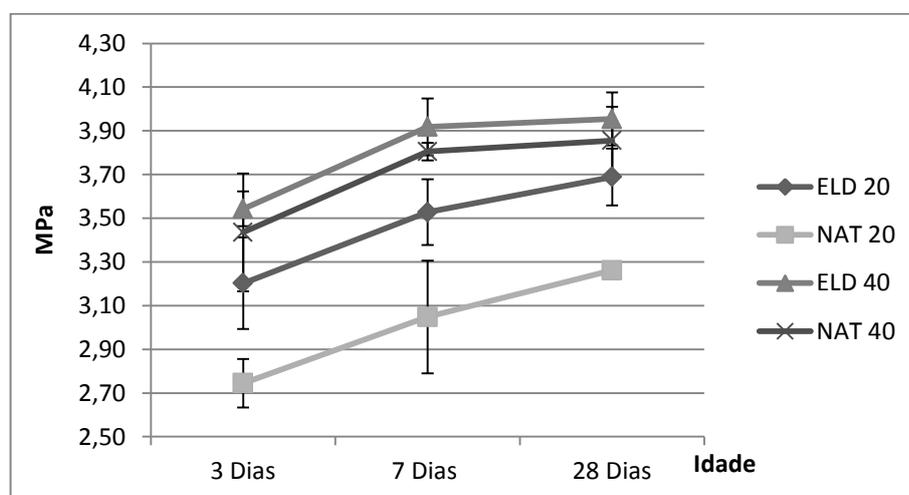


Figura 4.17: Resistência à tração por compressão diametral

4.6.4. Módulo de elasticidade

Os resultados para os módulos de elasticidade estático e dinâmico para os concretos ELD e NAT apresentam-se na Figura 4.18.

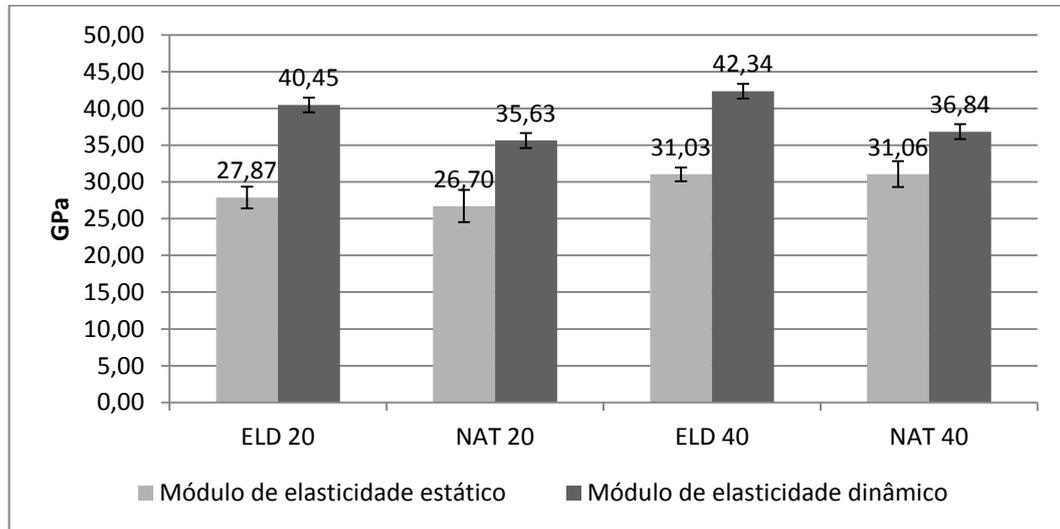


Figura 4.18: Módulos de elasticidade

Em consonância com resultados obtidos das observações realizadas para os parâmetros de resistência mecânica, pode-se inferir proporcionalidade entre as propriedades mecânicas e os valores obtidos para os módulos. Observa-se ainda uma boa proporcionalidade entre os valores obtidos para os módulos estático e dinâmico.

Os valores obtidos para os módulos de elasticidade refletem os achados registrados para características mecânicas e propriedades no estado endurecido, para os traços propostos, de forma coerente.

4.7. Aderência

Os resultados obtidos para análises conduzidas pelo ensaio Pull-out, apresentam-se nas Figura 4.19, Figura 4.20, Figura 4.21 e Figura 4.22, apresentadas a seguir. Pode-se observar que, para a classe C20, o concreto ELD apresenta maiores tensões de aderência que o concreto NAT. Esse comportamento pode ser explicado em função do melhor resultado de resistência à tração por compressão diametral do concreto ELD 20 em relação ao concreto NAT 20. Além disso, observou-se que o aumento do diâmetro da barra e o aumento da resistência à compressão levam a maiores tensões de aderência

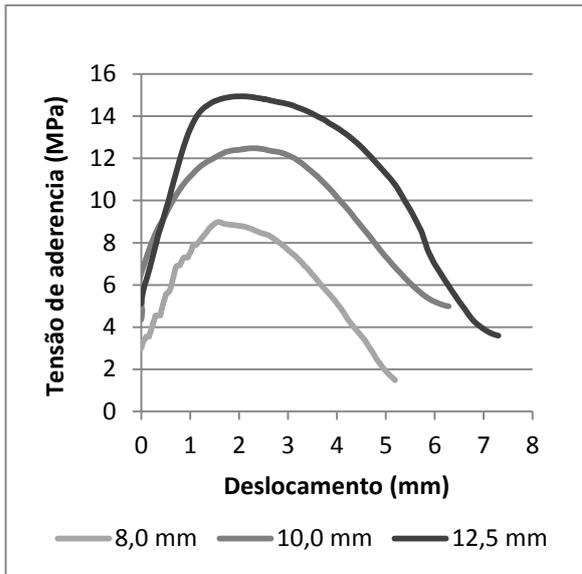


Figura 4.19: Tensão de aderência - ELD 20

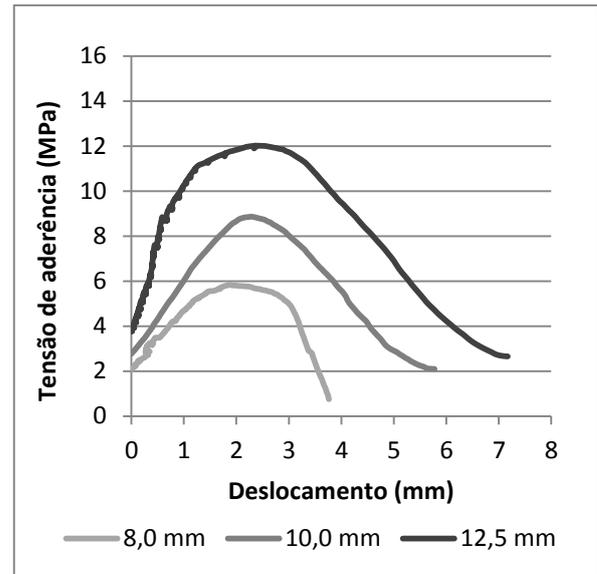


Figura 4.20: Tensão de aderência - NAT 20

. Nos concretos de classe C40, assim como nos de classe C20, houve um aumento de tensão de aderência com o aumento de diâmetro da barra. Pode-se observar também que os dois tipos de concreto apresentaram valores próximos de tensão de aderência máxima, porém para o concreto ELD, a maior tensão de aderência ocorreu para um maior valor de deslizamento. Os resultados mostram também que o aumento da resistência à compressão leva a maiores tensões de aderência.

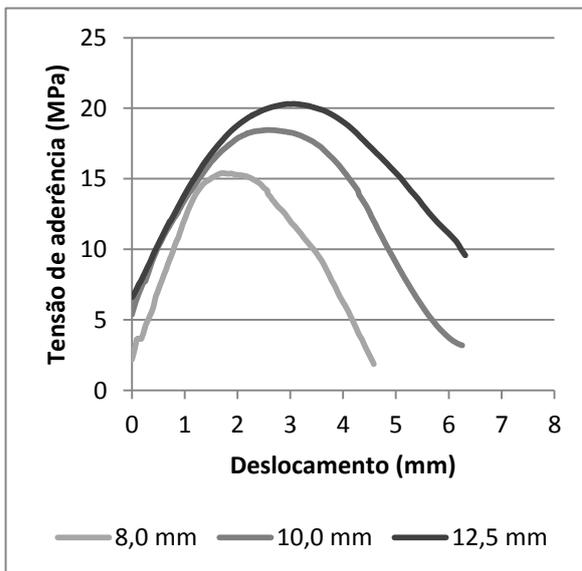


Figura 4.21: Tensão de aderência - ELD 40

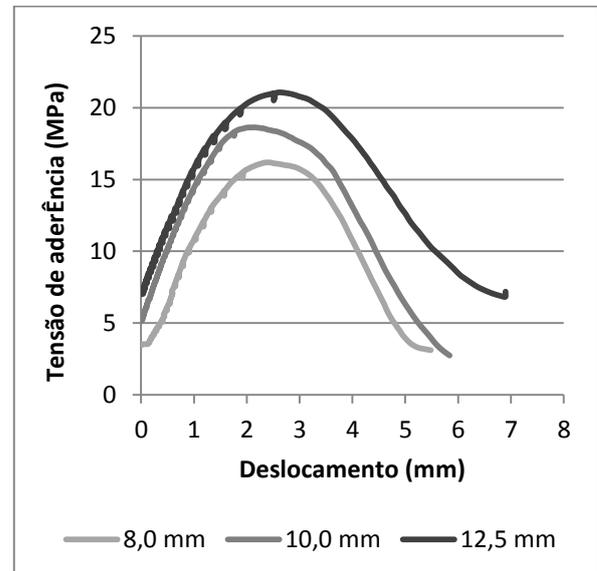


Figura 4.22: Tensão de aderência - NAT 40

O resultado obtido para o coeficiente de conformação superficial apresenta-se na Figura 4.23. De acordo com a NBR 7480: 2007, barras de aço tipo CA 50, com diâmetro menor que 10mm devem apresentar coeficiente de conformação superficial mínimo igual a 1,0. Para as barras

com diâmetro maior ou igual a 10mm o valor mínimo estabelecido é 1,5. Observa-se que a barra de 8mm atende ao limite mínimo em todos os tipos de concreto. A barra de 10mm apresentou coeficiente de conformação superficial abaixo do limite mínimo nos concretos C20, e valores próximos ao mínimo nos concretos C40. A barra de 12,5mm, atendeu ao coeficiente de conformação superficial mínimo exigido.

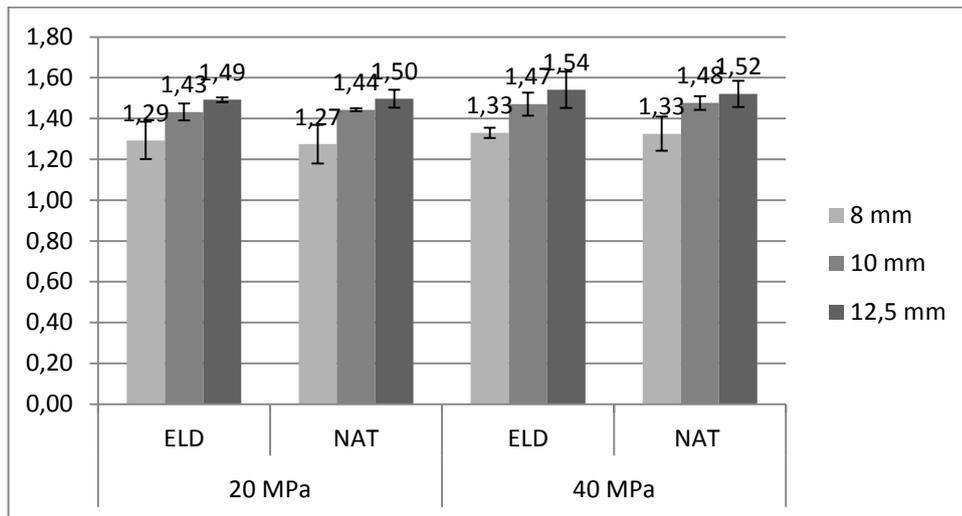


Figura 4.23: Coeficiente de conformação superficial

Para concretos ELD e NAT com mesma classe de resistência, observa-se um aumento do coeficiente de conformação superficial proporcionalmente ao aumento do diâmetro da barra. Essa observação fundamenta-se na proporcionalidade entre a tensão de aderência e área de contato das barras com o concreto.

O coeficiente de conformação superficial também é influenciado pela resistência à compressão do concreto. Observa-se que concretos C40 apresentaram maior conformação superficial que os concretos C20, considerando-se o mesmo diâmetro de barra.

Capítulo 5: Considerações finais

5.1. Conclusões

O processamento da escória de aciaria através da retirada da fração metálica no imã de rolo se mostrou eficiente, como observado através dos resultados de teor metálico e da fluorescência de raios x. Através do peneiramento, foi possível produzir agregados de escória granulometricamente parecidos aos agregados naturais, atendendo aos limites normativos.

A Tabela 5.1 apresenta de forma resumida os resultados obtidos da caracterização física dos agregados. Esses resultados mostraram que o agregado de escória é mais denso que os agregados naturais. O agregado de escória apresenta maior porosidade que o agregado natural, como indicam os resultados de umidade superficial, absorção de água e teor de umidade e as imagens estereoscópicas. O maior teor de material pulverulento presente na areia de escória, associado à sua maior porosidade contribuiu para o aumento da relação água/cimento necessária para alcançar a trabalhabilidade desejada.

Tabela 5.1: Caracterização física dos agregados

Propriedade	Agregado miúdo		Agregado graúdo	
	ELD	AN	ELD	BN
Módulo de finura	2,36	2,60	5,82	5,87
DMC	4,8	2,4	9,5	12,5
Massa específica (g/cm³)	3,27	2,67	3,53	2,77
Massa unitária (g/cm³)	1,60	1,47	1,85	1,49
Material pulverulento (%)	5,70	0,55	0,10	2,12
Umidade superficial (%)	7,13	0,56	-	-
Absorção de água (%)	7,71	0,72	2,05	1,20
Teor de umidade (%)	1,57	0,20	0,40	0,07

O dimensionamento das dosagens realizadas, com a utilização do software desenvolvido pelo grupo de pesquisa RECICLOS e adotando-se o método do ABCP, atingiu as resistências à compressão mínimas previstas aos 28 dias.

As análises físicas do concreto, indicadas na Tabela 5.2, mostraram que os concretos de escória apresentam maiores índices de vazios e absorção de água que os concretos

convencionais, isso ocorre em função da maior quantidade de água de amassamento necessária para atingir a trabalhabilidade de projeto. Assim com os agregados, os concretos de escória (ELD) são mais densos que os naturais (NAT).

Tabela 5.2: Caracterização física do concreto

Propriedade		ELD 20	NAT 20	ELD 40	NAT 40
Estado fresco	Teor de ar incorporado (%)	2,8	2,4	2,7	2,2
	Massa específica (kg/m ³)	2653	2348	2598	2355
Estado endurecido	Absorção de água (%)	7,53	6,17	5,50	3,74
	Índice de vazios (%)	18,55	13,81	13,75	8,62
	Massa específica seca (g/cm ³)	2,46	2,24	2,47	2,29
	Massa específica saturada (g/cm ³)	2,65	2,38	2,62	2,39
	Massa específica real (g/cm ³)	3,02	2,60	2,91	2,53

Os resultados dos ensaios mecânicos dos concretos, apresentados na Tabela 5.3, mostram que para a classe C20, o concreto de escória alcançou melhores resultados nas primeiras idades que o concreto convencional, porém, aos 28 dias essa diferença se tornou não significativa. Para a classe C40, ambos tipos de concreto (ELD e NAT) apresentaram resultados próximos para todas as idades.

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral mostraram que, para a classe C20, o concreto de escória possui melhor desempenho que o concreto convencional para todas as idades estudadas, já para a classe C40, os concretos apresentaram resultados próximos em todas as idades.

Tabela 5.3: Propriedades mecânicas do concreto

Propriedade	Idade	ELD 20	NAT 20	ELD 40	NAT 40
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	31,10	25,68	41,55	40,88
	7 dias	34,04	30,38	45,39	44,27
	28 dias	35,43	34,67	49,12	47,45
Tração diametral (MPa)	3 dias	3,20	2,74	3,54	3,44
	7 dias	3,53	3,05	3,92	3,80
	28 dias	3,69	3,26	3,95	3,86

Assim como os resultados de resistência à compressão, não houve diferença significativa para o módulo de elasticidade estático entre os concretos ELD e NAT, como mostrado na Tabela 5.4. Os concretos ELD apresentaram maiores valores para o módulo de elasticidade dinâmico devido à maior densidade deste tipo de concreto.

Tabela 5.4: Módulos de elasticidade

	ELD 20	NAT 20	ELD 40	NAT 40
Módulo de elasticidade estático (GPa)	27,87	26,70	31,03	31,06
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	40,45	35,63	42,34	36,84

Os resultados obtidos para o ensaio de arrancamento mostraram que barras de maiores diâmetros geram maiores tensões de aderência. Verificou-se também que concretos com maior resistência mecânica apresentam maiores tensões de aderência. O concreto de escória apresentou maior aderência que o concreto convencional para a classe C20, já para a classe C40 as tensões de aderência foram próximas em ambos os tipos de concreto.

Com relação ao ensaio de aderência realizado de acordo com a NBR 7477:1982, não foi observada diferença significativa entre os dois tipos de concreto, porém conclui-se que o coeficiente de conformação superficial aumenta com o aumento do diâmetro e com o aumento da resistência à compressão do concreto.

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, conclui-se que existe aderência de barras de aço tipo CA 50 em concretos produzidos a partir da substituição total dos agregados naturais, por agregados pós-processados de escória de aciaria LD.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

- Estudar a durabilidade de peças armadas produzidas com concretos de escória
- Estudar a influência de diferentes tipos de nervura na aderência aço-concreto
- Avaliar a resistência mecânica dos concretos de escória a longo prazo
- Comparar as curvas experimentais obtidas com modelos teóricos
- Realização do ensaio de vigas para avaliar a tensão de aderência em elementos mais próximos de estruturas reais

Referências

ABOSRRA, L.; ASHOUR, A. F.; YOUSEFFI, M. **Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths**. *Construction and Building Materials*. v. 25. pp. 3915–3925. 2011

ALMEIDA, S. F. **Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura**. 2005. 165p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Paulo. São Carlos. 2005

ALMEIDA, S. M. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. 2012. 213p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2012.

ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. 228 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2003). **ACI 408R-03** Reported by ACI COMMITTEE 408. Bond and development of straight reinforcing bars in tension. Farmington Hills.

ARAÚJO, S. S. **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto**. 2011. 212p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2011

ARAÚJO, A.L. **Manual de Siderurgia: Produção**. São Paulo, v. 1, Editora Arte & Ciência, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS (ABM). **Gestão de coprodutos**. Estudo prospectivo do setor siderúrgico. Brasília. 2008. 28p.

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 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 47** – Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco. 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 5738** – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003. Emd, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118** – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6892-1** – Materiais metálicos — Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211** – Agregados para concreto — 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 8522** – Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8953** – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2009.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12821** – Preparação de concreto em laboratório – Procedimento. Rio de Janeiro, 2011.

BARRETO, I. M. C. B. do N. **Gestão de resíduos na construção civil**. Sergipe: Sinduscon, 2005.

BASTOS, P. S. S. **Estruturas de concreto I - Notas de aula - Fundamentos do concreto armado**. Universidade Estadual Paulista. Baurú, 2006.

BELGO GRUPO ARCELOR. **I Workshop sobre escória**. Piracicaba, 2006.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. 83p. Dissertação (Mestrado) – universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo. 2012.

BRANCO, V. T. F. C. **Caracterização de misturas asfálticas com uso de escória de aciaria como agregado**. 2004. 135p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2004.

CALDAS, J. A. C. **Análise de duas rotas tecnológicas na siderurgia brasileira com foco na eficiência energética**. 2011. 47p. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2011.

CASTRO, C. M. **Concreto de alto desempenho: Estudo da aderência com a armadura sob ações repetidas**. 2002. 223p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos. 2002.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (2012). **Bulletin d'Information no. 65**: CEB-FIB Model Code 2010. Paris.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. RILEM/CEB/FIP RC6: BOND TEST FOR REINFORCING STEEL - 1 - Pull-out test. Paris: CEB, 1983. 3p.

CORREIA V. C. **Estudo da influência do uso de fibras de aço e de estribos no comportamento da ancoragem de barras**. 2012. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos. 2012.

DUMÊT, T. B. **Aderência de cordoalhas em concretos de alta resistência com e sem fibras de aço**. 2003. 331p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

FERREIRA, G. E.; PEREIRA, L. S. Mercado de agregados no Brasil. In: ALMEIDA, S. L. M., LUZ, A. B. **Manual de agregados para a construção civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009.

FILHO, F. M. A. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis**. 2006. 292p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos. 2006.

FRANÇA, V.H. **Aderência aço-concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. 2004. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Ilha Solteira. 2004.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1995. 265p.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. 2001. 187p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

GRAFFITTI, D. F. **Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica**. 2002. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2002.

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

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2012**. Rio de Janeiro, 2012, 92p.

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

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

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira – 7ª Edição**. Brasília, 2012, 65p.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. **Agregados para a construção civil**. In: RODRIGUES, A. F. S. (Coordenação). **Economia mineral do Brasil**. Brasília – DF: DNPM, 2009. p. 602 – 635.

LAURIANO, L. A. **Relatório de pesquisa: Como anda a gestão da sustentabilidade no setor da construção?** Nova Lima, 2013, 49p.

- LEAL, A. C. F. S. **Investigação experimental do módulo de elasticidade nos concretos produzidos em Brasília.** 2012. 151p. Dissertação (mestrado) – Universidade de Brasília. Brasília. 2012.
- LEONHARDT, F; MOMMIG, E. **Construções de concreto.** Rio de Janeiro: Inter ciência, 1977. 6v.
- LOBATO, N. C. C. **Gerenciamento de resíduos sólidos da indústria siderúrgica.** 2014. 143p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2014.
- JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar.** Disponível em <http://www.reciclagem.pcc.usp.br>. Acessado em 06/05/2013
- 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. 2000.
- MACGREGOR, J. G. **Reforce concrete: mecânicos and design.** Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall. 1988.
- MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria.** 2000. 135p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000.
- MASUERO, A. B.; MOLIN, D. C. C. D.; VILELA, A. C. F. **Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p.57 – 81, abr. / jun. 2004.
- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI. 1994. 573p.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 3.ed. 2008. 674p.
- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON. 2014. 782p.
- MOTZ, H.; GEISELER J. **Products of steel slags an opportunity to save natural resources.** Waste Management, p. 285 – 293, 2001.

NETO, J. M. **Análise numérica não-linear de estruturas de concreto armado considerando o fenômeno da aderência entre o aço e o concreto.** 2007. 192p. Tese - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2007.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: PINI.1982.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** Porto Alegre: Goodman. 2013. 472p.

PEIXOTO, R. A. F. **Escória de aciaria – Arcelor Mitral. Relatório final de Pesquisa em Ciência, Desenvolvimento e Tecnologia para aplicação de escória de aciaria como fração inerte para matrizes de cimento Portland em obras de Infraestrutura e Construção Civil. Concreto, Argamassa, Blocos de Concreto para Alvenaria, Blocos de Concreto para Pavimentação.** 448p, 2013.

PEIXOTO, R. A. F.; PADULA, F. R. G. **Uso de escória de aciaria em ciclovias de pavimento rígido.** TechNet. Revista de Tecnologia da Construção, v. 142, p. 58/1-62, 2009.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D. **Aderência e ancoragem – Capítulo 10.** Notas de aula. Departamento de Engenharia de Estruturas - USP – EESC. 2003

POLESE, M. O.; CARREIRO, G. L.; SILVA, M. G. **Caracterização Microestrutura da Escória de Aciaria.** Revista Matéria, v. 11, n. 4, pp. 444 – 454, 2006.

RAMOS, F. M.; POLISSENI, A. E.; FREESZ, J. W. S. **Gestão ambiental da escória de aciaria.** Portal metálica - Construção civil. <http://www.metalica.com.br/gestao-ambiental-da-escoria-de-aciaria>. <acessado em: 01/09/2015>

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – Estudo laboratorial.** 2002. 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2002.

REHM, G. (1961). **On the basic behaviour of bond between steel and concrete,** Deutscher Ausschub für Stahlbeton, n.138.

REHM, G. **On the basic behaviour of bond between steel and concrete,** Deutscher Ausschub für Stahlbeton, n.138. 1961

RUBIO A.R.; CARRETERO, J. G. **La aplicación de las escorias de acería en carreteras.** Ingeniería Civil, v.80, p. 5-8, 1991.

SANTANA, I. V. **Estudo da influência das fibras metálicas no comportamento da aderência entre barras de aço e concretos de diferentes classes de resistência.** 2014. 246p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos. 2014.

SANTOS, D. H.; MARINHO, A. L. B.; BARROS, T. R.; SILVA, G. B.; PEIXOTO, R. A. F. **Blocos de concreto produzidos com escória de aciaria para alvenaria modular.** In: 56º Congresso Brasileiro de Concreto, 2014, Natal.

SILVA, E.A.; R.L. MENDONÇA e C.H.M. DOBELE. **Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento.** 16º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ, trabalho convidado, 2002.

SILVA, E.A.; R.L. MENDONÇA, C.H.M. DOBELE, M. SIQUEIRA e J.B. SOARES, 2003. **Uma experiência inédita: uso da escória de aciaria LD em todas as camadas do pavimento.** 34ª Reunião Anual de Pavimentação, Campinas, SP, v. I, p. 238-244.

SOUZA, B. P.; TOFFOLO, R. M.; CHIBLI, P. A.; CURY, A. A.; PEIXOTO, R. F. **Aplicação de escória de aciaria como agregado em concreto para pavimentação.** In: 56º Congresso Brasileiro de Concreto, 2014, Natal.

SOUZA, E. B. O. **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação.** 2007. 111p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.

TOFFOLO, R. V. M. **Pavimentos sustentáveis.** 2015. 92p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2015.

TOJAL, T. L. **Contribuição ao estudo da aderência de barras de aço em concreto autoadensável reforçado com fibras metálicas.** 2011. 114p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas. Maceió. 2011.