

**INFLUÊNCIA DA
MICROESTRUTURA E DAS
CARACTERÍSTICAS DOS
AGREGADOS NAS
PROPRIEDADES
MECÂNICAS DO CONCRETO
DE CIMENTO PORTLAND:
UMA REVISÃO DA
LITERATURA**

**INFLUENCE OF MICROSTRUCTURE AND AGGREGATE CHARACTERISTICS
ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT CONCRETE: A
LITERATURE REVIEW**

Engenharias • 06/08/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/785882799](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/785882799)

Adriano Luiz Roma Vasconcelos¹

Williams Jorge da Cruz Macêdo²

João Carlos Lisboa de Lima³

Thiago Rodrigues Gonçalves Caetano⁴

Aldemar Batista Tavares de Sousa⁵

Patrícia da Silva Chaves⁶

Wilson Damasceno Monteiro Junior⁷

Sabino Alves de Aguiar Neto⁸

Dênio Ramam Carvalho de Oliveira⁹

Elsimar Souza Santos¹⁰

Marcelo Martins Farias¹¹

Celestina Lima de Rezende Farias¹²

Leonardo Calheiros Rodrigues¹³

RESUMO

O concreto de cimento Portland é um material compósito cujas propriedades mecânicas dependem diretamente das características de seus constituintes e das interações desenvolvidas em sua microestrutura. Dentre os fatores que influenciam seu desempenho, destacam-se as propriedades físicas dos agregados e a zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta cimentícia, considerada a região mais suscetível ao surgimento e à propagação de microfissuras. O presente trabalho tem por objetivo revisar os principais aspectos relacionados à influência da microestrutura do concreto sobre suas propriedades mecânicas, enfatizando o papel da zona de transição, da composição e das características físicas dos agregados. São discutidos conceitos referentes à macro e microestrutura do concreto, bem como a influência da forma, textura superficial, granulometria, resistência à abrasão e módulo de elasticidade dos agregados sobre a trabalhabilidade, a resistência à compressão axial, a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade do concreto. A revisão evidencia que o desempenho mecânico do concreto está intimamente relacionado à qualidade da interface agregado–matriz cimentícia e às propriedades dos agregados empregados, demonstrando que a compreensão desses mecanismos é essencial para o desenvolvimento de concretos com desempenho mecânico superior e maior durabilidade.

Palavras-chave: Concreto de cimento Portland; Zona de transição; Agregados; Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Portland cement concrete is a composite material whose mechanical properties are directly dependent on the characteristics of its constituents and the interactions developed within its

microstructure. Among the factors influencing its performance, the physical properties of aggregates and the interfacial transition zone (ITZ) between coarse aggregate and cement paste stand out, as this region is the most susceptible to the initiation and propagation of microcracks. This study aims to review the main aspects related to the influence of concrete microstructure on its mechanical properties, emphasizing the role of the interfacial transition zone, aggregate composition, and the physical characteristics of aggregates. Concepts related to the macrostructure and microstructure of concrete are discussed, as well as the influence of aggregate shape, surface texture, particle size distribution, abrasion resistance, and modulus of elasticity on workability, compressive strength, splitting tensile strength, and the modulus of elasticity of concrete. The review highlights that the mechanical performance of concrete is closely associated with the quality of the aggregate–cement paste interface and the properties of the aggregates used, demonstrating that understanding these mechanisms is essential for the development of concrete with enhanced mechanical performance and improved durability.

Keywords: Portland cement concrete; Interfacial transition zone; Aggregates; Mechanical properties.

1. INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é o material de construção mais empregado no mundo, devido à sua elevada versatilidade, disponibilidade de matérias-primas, facilidade de moldagem e desempenho estrutural. Suas propriedades permitem ampla utilização em edificações, obras de infraestrutura e elementos pré-moldados, tornando-o indispensável para o desenvolvimento da construção civil. Entretanto, o desempenho desse material não

depende exclusivamente da resistência da pasta cimentícia, mas da interação entre seus constituintes e da qualidade da microestrutura formada durante o processo de hidratação (Alizadeh *et al.*, 1996).

Embora frequentemente tratado como um material homogêneo em análises macroscópicas, o concreto apresenta uma estrutura altamente heterogênea, composta pela pasta de cimento hidratada, agregados e pela zona de transição entre essas fases. Essa região interfacial é considerada um dos componentes mais importantes para o comportamento mecânico do concreto, uma vez que concentra maior porosidade e microfissuração, influenciando diretamente a transferência de tensões entre a matriz cimentícia e os agregados. Consequentemente, alterações nas características dessa interface refletem no desempenho mecânico e na durabilidade do material (Metha; Monteiro, 2008).

Os agregados, responsáveis por aproximadamente três quartos do volume do concreto, também desempenham papel fundamental em suas propriedades. Características como composição mineralógica, granulometria, forma, textura superficial, massa específica, porosidade e módulo de elasticidade exercem influência significativa sobre a trabalhabilidade do concreto fresco e sobre propriedades mecânicas, como resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Dessa forma, a compreensão da influência dos agregados e da zona de transição torna-se essencial para o desenvolvimento de concretos com melhor desempenho estrutural e maior vida útil (Callister, 2005; Metha; Monteiro, 2008).

Nas últimas décadas, diversos estudos têm demonstrado que a análise da microestrutura do concreto constitui uma importante ferramenta para explicar o comportamento macroscópico do

material. A correlação entre as características microestruturais e as propriedades mecânicas tem permitido compreender os mecanismos responsáveis pela iniciação e propagação de fissuras, pela rigidez do material e pelos processos de ruptura, contribuindo para o aperfeiçoamento dos materiais constituintes e das técnicas de dosagem (Callister, 2005).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão da literatura acerca da influência da microestrutura, da zona de transição agregado–matriz e das características dos agregados nas propriedades mecânicas do concreto de cimento Portland, discutindo os principais fatores que condicionam seu desempenho no estado fresco e endurecido e evidenciando a importância desses parâmetros para a obtenção de concretos de elevado desempenho.

2. METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de natureza qualitativa e caráter descritivo, desenvolvida com o objetivo de reunir, analisar e discutir o conhecimento científico disponível acerca da influência da microestrutura do concreto de cimento Portland sobre suas propriedades mecânicas, com ênfase na zona de transição entre o agregado gráúdo e a pasta cimentícia e nas características físicas dos agregados empregados.

O levantamento bibliográfico foi realizado por meio da consulta a livros clássicos da tecnologia do concreto, normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e artigos científicos publicados em periódicos nacionais e internacionais de reconhecida relevância na área da engenharia civil e dos materiais de construção.

Foram priorizadas obras de referência amplamente consolidadas, como as de Mehta e Monteiro, Neville, Isaia e Coutinho, complementadas por estudos experimentais que abordam a relação entre a microestrutura do concreto e seu comportamento mecânico.

A seleção das publicações considerou estudos que apresentassem informações sobre a constituição microestrutural do concreto, a formação e evolução da zona de transição agregado–matriz cimentícia, as propriedades físicas dos agregados e sua influência na trabalhabilidade, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e durabilidade do concreto. Também foram consultadas normas técnicas relacionadas à caracterização de agregados e aos ensaios tecnológicos aplicáveis ao concreto.

Após a seleção do material bibliográfico, procedeu-se à leitura crítica e à análise comparativa das informações obtidas, buscando identificar convergências e divergências entre os autores quanto aos mecanismos responsáveis pelo comportamento mecânico do concreto. Os resultados foram organizados em tópicos temáticos abordando a macroestrutura e a microestrutura do concreto, a zona de transição, as propriedades dos agregados e a influência desses fatores sobre as principais propriedades mecânicas do material.

Por fim, realizou-se uma síntese crítica das evidências encontradas, estabelecendo relações entre os aspectos microestruturais e o desempenho mecânico do concreto de cimento Portland, de modo a fornecer uma visão integrada dos fatores que condicionam sua resistência, rigidez e durabilidade, contribuindo para a compreensão

dos mecanismos envolvidos no desenvolvimento de concretos de elevado desempenho.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Concreto: Estrutura e Propriedades

O concreto é um material compósito comum feito com partículas grandes, onde as fases matrizes e dispersa são compostas por materiais heterogêneos. Este material compósito consiste em um agregado de partículas que estão ligadas umas às outras em um corpo sólido através do cimento Portland. Desta forma, os ingredientes que compõe o concreto são o cimento Portland, agregado miúdo (geralmente areia), agregado graúdo (normalmente brita) e água (Callister, 2005).

Para Mehta e Monteiro (2014), o concreto é um material compósito que consiste essencialmente de um meio aglomerante no qual estão aglutinados partículas ou fragmentos de agregado. No concreto de cimento hidráulico, o aglomerante é formado através da mistura proveniente do cimento hidráulico com a água.

3.2. Macroestrutura do Concreto

Macroestruturalmente, o concreto possui dois constituintes principais: a pasta de cimento endurecida e as partículas de agregados graúdos e miúdos. Cada uma das fases do concreto é de natureza multifásica, sendo que cada partícula de agregado pode ser composta por inúmeros minerais, além de fissuras e vazios. A matriz da pasta de cimento apresenta uma distribuição heterogênea, de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras, e as mudanças micro estruturais que ocorrem

nos compostos formados na hidratação do cimento com o decorrer do tempo (Metha & Monteiro, 2014).

A Figura 1 demonstra duas fases que podem facilmente ser distinguidas a olho nu, as partículas de agregado com tamanhos e formas variados, e o meio ligante, composto de uma pasta de cimento hidratado constituída por numerosas e diferentes fases.

Figura 1. Secção de um corpo de prova de concreto



Fonte: Metha & Monteiro, 2014.

Sendo assim, em nível macroscópico o concreto pode ser considerado um material bifásico, composto por partículas de agregado dispersas em uma matriz cimentícia.

3.3. Microestrutura do Concreto

O concreto de cimento Portland é um material poroso, que apresenta uma estrutura bastante heterogênea e complexa. De acordo com Metha & Monteiro (2014), as propriedades de um

material têm origem na sua estrutura interna. A estrutura de um material é constituída pelo tipo, tamanho, quantidade, forma e distribuição das fases presentes. O concreto é composto basicamente por três fases distintas (Figura 2):

- Pasta: geralmente constituído por pasta de cimento Portland, tem como principal função envolver os agregados, preenchendo os vazios formados e possibilitar ao concreto a trabalhabilidade adequada para sua aplicação;
- Agregados: a fase agregado é predominantemente responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Estas propriedades do concreto dependem fundamentalmente da densidade e resistência do agregado, que, por sua vez, são determinadas mais por características físicas do que por características químicas da estrutura do agregado;
- Zona de transição: representa a região interfacial entre as partículas de agregado graúdo e a pasta. Composta por uma camada delgada, tipicamente de 10 μm a 50 μm de espessura em volta do agregado graúdo. A zona de transição é usualmente mais fraca do que os outros dois componentes principais do concreto, e, conseqüentemente, exerce uma influência muito maior sobre o comportamento mecânico do concreto do que pode ser esperado pela sua dimensão.

Figura 2. Representação esquemática da microestrutura do concreto



Fonte: adaptado de Metha & Monteiro, 2014.

Ao se analisar a microestrutura de um concreto, por intermédio de um microscópio, observa-se que a pasta de cimento em contato com o agregado possui características diferentes do restante da pasta, podendo ser considerada mais uma fase constituinte do concreto, denominada de zona de transição. O conhecimento dos elementos da microestrutura do concreto é essencial no entendimento de propriedades importantes do concreto, tais como a resistência à compressão, módulo de elasticidade, retração, porosidade e durabilidade.

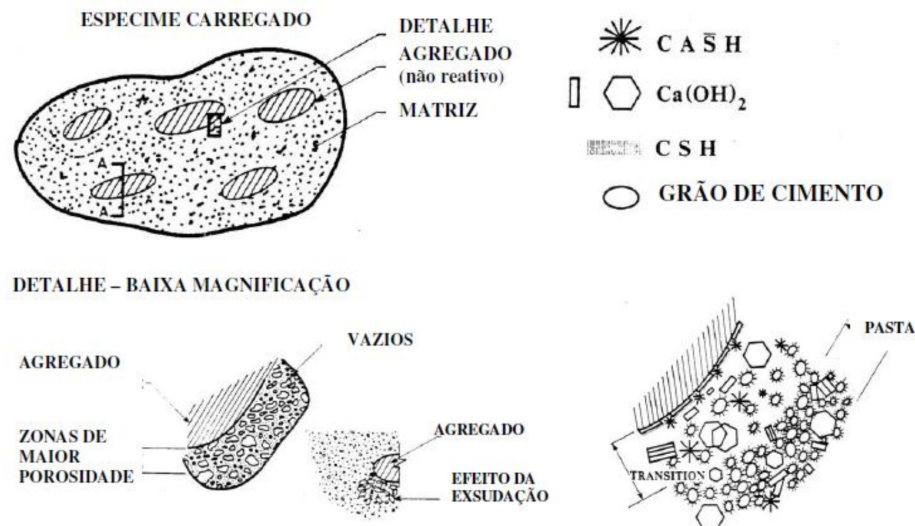
3.4. Matriz e Zona de Transição Entre a Pasta e o Agregado Graúdo

A matriz de pasta do cimento que envolve os agregados é composta por diferentes tipos de compostos hidratados do cimento. Os mais importantes são os silicatos hidratados, C-S-H, que se assemelham a estruturas fibrosas, o hidróxido de cálcio, Ca (OH)₂, que cristaliza em

grandes placas hexagonais superpostas e pôr fim a etringita, que se solidifica no início da pega na forma de agulhas.

A zona de transição caracteriza-se por ser uma região com maior porosidade e heterogeneidade que o restante da pasta. Esta porosidade é decorrente da elevação na relação água/cimento na mistura em virtude do filme de água em que se forma em volta do agregado durante a exsudação e sedimentação do concreto. Os maiores espaços permitem a formação de grandes cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandita) com o seu eixo orientado perpendicularmente ao agregado, produzindo planos preferenciais de ruptura, como pode ser visto na Figura 3.

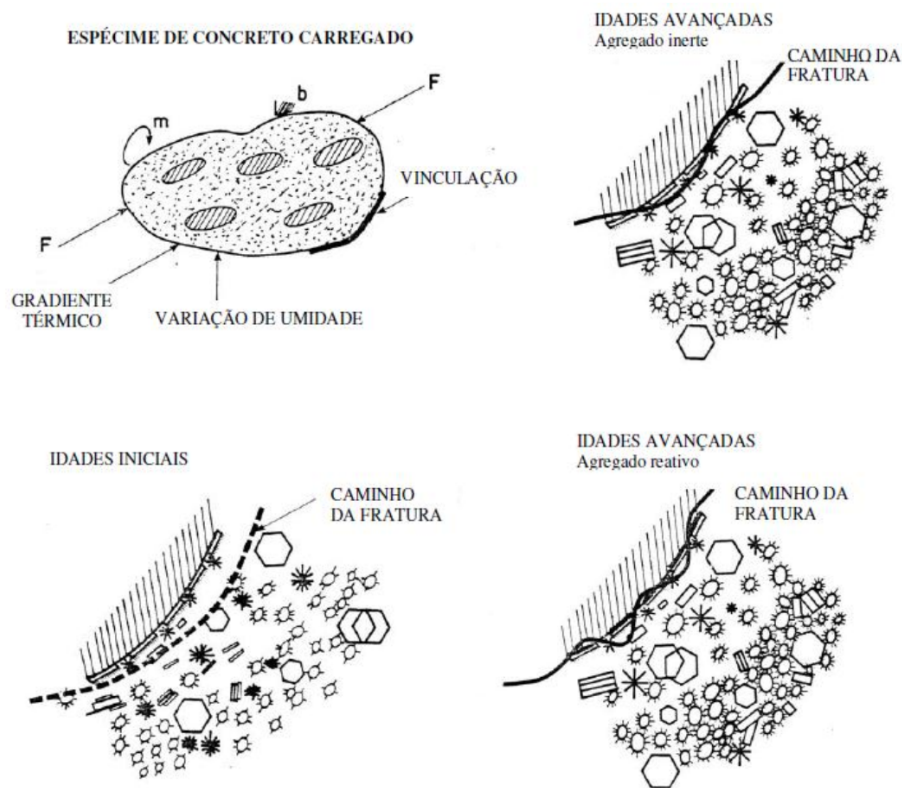
Figura 3. Representação esquemática da zona de transição entre a pasta de cimento e agregado.



Fonte: Monteiro, 1985.

A zona de transição estará sujeita à micro fissuração muito facilmente. A Figura 4 expõe o caminho das microfissuras para diferentes idades do concreto, utilizando ou não agregado reativo.

Figura 4. Representação esquemática do caminho de propagação de fissuras na zona de transição.



Fonte: Monteiro, 1985.

Quando o concreto é submetido ao carregamento, nas primeiras idades, as microfissuras tendem a se propagar na zona de transição, em função da mesma apresentar um alto índice de porosidade. No entanto, com o tempo a zona de transição é preenchida com produtos de hidratação e as fissuras passam a se propagar pelo filme de hidróxido de cálcio (Monteiro, 1985).

A relação entre a quantidade de água e cimento (relação a/c) deve ser a menor possível, dentro das características exigidas pelo concreto e pela qualidade dos materiais disponíveis para sua confecção. A relação a/c afeta diretamente a zona de transição. Quanto maior a relação água/cimento, mais poroso é o concreto e, conseqüentemente, menos resistente é a ligação entre a pasta de cimento hidratada e o agregado.

3.5. Influência da Zona de Transição nas Propriedades do Concreto

A zona de transição, geralmente o “elo mais fraco da corrente”, é considerada a fase de resistência limite no concreto. É em função do surgimento da zona de transição que o concreto rompe a um nível de tensão consideravelmente inferior a resistência dos dois constituintes principais (pasta e agregados).

Em níveis não muito elevados de energia para estender as fissuras já existentes na zona de transição, a partir de tensões de 40 % a 70 % da resistência última, já se percebe incrementos de deformação por unidade de força aplicada. A partir de níveis de tensão superiores a 70 % da carga última já se formam novas fissuras, que vão se propagando gradativamente até unirem-se às fissuras presentes na zona de transição. Este fato, que pode levar o material à ruptura. Sob cargas de tração, as fissuras se propagam a um nível consideravelmente mais baixo. Com relação ao módulo de elasticidade, a estrutura da zona de transição, principalmente o volume de vazios considerado e a presença de microfissuras, provoca grande interferência. No concreto, a zona de transição serve de ponte entre a matriz e o agregado graúdo. Mesmo que os materiais constituintes (pasta e agregado graúdo) possuam elevada rigidez, a rigidez do material composto pode ser baixa em função da presença de vazios e das microfissuras presentes na zona de transição, as quais não permitem transferência de resistência (Metha & Monteiro, 1994).

3.6. Agregados

Agregados são relativamente baratos e não entram em reações químicas complexas com a água; portanto, tem sido usualmente tratado como um material de enchimento inerte no concreto. Entretanto, devido à crescente compreensão de muitas

propriedades importantes do concreto, este ponto de vista tradicional dos agregados como materiais inertes estão sendo seriamente questionados.

De acordo com a NBR 9935 (ABNT, 2011), agregado é um material granular, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto. Como citado acima, o agregado não se apresenta como um material exclusivamente inerte, pois as propriedades físicas, térmicas e, em alguns casos químicos têm influência no desempenho do concreto (Neville, 1997).

Os agregados devem ser compostos por grãos minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, assim como não devem conter substâncias de natureza e quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto NBR 7211 (ABNT, 2011).

Responsáveis em média por 75 % do volume de concreto, os agregados influenciam em inúmeras propriedades do concreto. As características dos agregados que são importantes para a tecnologia do concreto incluem porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência à compressão, módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes. Estas características derivam da composição mineralógica da rocha matriz (que é afetada pelos processos geológicos de formação da rocha), das condições de exposição às quais a rocha foi submetida antes de gerar o agregado, e dos tipos de operação equipamento usados na produção do agregado.

O conhecimento de certas características dos agregados, a exemplo da massa específica, composição granulométrica e teor de umidade é uma exigência para a dosagem dos concretos. A porosidade, massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial determinam as propriedades dos concretos no estado fresco. Além da porosidade, a composição mineralógica do agregado afeta a sua resistência à compressão, dureza, módulo de elasticidade e sanidade, que por sua vez influenciam em várias propriedades do concreto endurecido contendo o agregado. As características dos agregados que são importantes para a tecnologia do concreto, decorrem da microestrutura do material, das condições prévias de exposição e do processo de fabricação.

A resistência à compressão, a resistência à abrasão e o módulo de elasticidade dos agregados são propriedades inter-relacionadas, que são influenciadas pela porosidade. A resistência do concreto não depende exclusivamente da resistência mecânica dos agregados, mas também, de sua absorção e características de aderência. Segundo (Neville, 1997), o módulo de elasticidade do concreto é diretamente proporcional ao módulo dos agregados graúdos e o percentual que o constitui. O módulo de elasticidade dos agregados também influencia na retração e fluência do concreto. Uma considerável diferença entre o módulo de elasticidade do agregado e da pasta de cimento hidratada irá propiciar o desenvolvimento de microfissuras na interface agregado-matriz, isto é, zona de transição do concreto (Neville, 1997).

3.7. Forma e Textura Superficial das Partículas

A forma e a textura das partículas dos agregados influenciam mais nas propriedades do concreto no estado fresco do que endurecido.

Comparadas às partículas lisas e arredondadas, as partículas que apresentam textura áspera, angulosas requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis, e, portanto, aumentam o custo final do concreto.

De acordo com (Isaia, 2007), a forma dos agregados está diretamente relacionada à sua geometria tridimensional. No entanto, é difícil representar tridimensionalmente corpos irregulares, sendo assim é mais conveniente classificá-los em função de características geométricas bidimensionais, a exemplo do alongamento, achatamento, cubicidade, esfericidade, angulosidade, entre outros.

As partículas alongadas, em forma de lâmina, devem ser evitadas ou limitadas a no máximo 15%, em massa, do total do agregado. Este critério se aplica não apenas para agregado graúdo, mas também para areias artificiais (resultantes da britagem de rochas), que contêm grãos alongados e produz concreto muito áspero, os agregados devem ser relativamente, isentos de partículas alongadas e lamelares e o índice de forma deve estar abaixo de 3, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Meththa e Monteiro (2014) citam que concretos com partículas de textura áspera, angulosa e alongada carecem de um volume maior de pasta de cimento que partículas arredondadas e lisas. Esse aumento no volume de pasta afeta diretamente no custo final do produto.

Caso o concreto seja constituído de partículas menos angulosas, este apresentará ângulos de atrito interno relativamente baixo, conduzindo a um melhor arranjo das partículas e,

consequentemente, implicará em melhores níveis de trabalhabilidade e compacidade (Coutinho, 2000).

3.8. Composição Granulométrica

Ao se analisar a granulometria dos agregados, verifica-se que os agregados que possuem maiores dimensões máximas características tendem a gerar um maior índice de microfissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta de cimento, o que por sua vez prejudica a permeabilidade e o desempenho mecânico do concreto. Ressalta-se que a micro fissuração na zona de transição apresenta um efeito mais danoso na resistência à flexão e no módulo de deformação do que na resistência do concreto à compressão axial (Metha & Monteiro, 2014). Composições granulométricas racionais garantem uma melhor trabalhabilidade do concreto no estado fresco, e uma menor permeabilidade no concreto endurecido, aumentando seu desempenho mecânico e durabilidade frente a agentes agressivos.

3.9. Resistência à Abrasão

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a resistência à abrasão se inter-relaciona com propriedades tais como resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade.

O ensaio de Abrasão Los Angeles permite aferir a resistência ao desgaste sofrido pelo material, quando submetido a um determinado número de revoluções na máquina Los Angeles, juntamente com uma carga abrasiva à velocidade de 30 a 33 RPM NBR NM 51 (ABNT, 2001). O valor obtido pelo ensaio serve como parâmetro de qualidade do material a ser inserido no concreto, visto

que representa a capacidade de fragmentação por choque e atrito das partículas graúdas.

No caso dos agregados provenientes de resíduos siderúrgicos, apesar de ainda não existir uma referência normativa que estabeleça o limite máximo de perda de massa por resistência à abrasão, seu conhecimento é de suma importância, pois interfere nas principais propriedades do concreto.

3.10. Propriedades do Concreto

3.10.1. Trabalhabilidade

As propriedades do concreto no estado plástico são de suma importância, pois para produzir concretos endurecidos de boa qualidade é necessário garantir deste, também no estado fresco.

De acordo com a ASTM C 125 (1995), a trabalhabilidade do concreto é definida como sendo a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. O termo manipular inclui as operações referentes às primeiras idades como lançamento, adensamento e acabamento.

A trabalhabilidade é uma propriedade composta por ao menos dois componentes principais; Consistência (descreve a facilidade de escoar) e coesão (descreve a resistência à exsudação e à segregação). O conceito de trabalhabilidade não se refere a uma propriedade intrínseca do concreto, pois, para fazer sentido, deve ser relacionada com o tipo de construção e o método de lançamento, adensamento e acabamento (Metha & Monteiro, 2014). Coutinho (1997b) define trabalhabilidade como a “maior ou menor com que o

concreto é transportado, lançado, adensado e acabado e a maior ou menor facilidade com que se desagrega ou segrega durante essas operações é designada pelo termo genérico trabalhabilidade”. Segundo Neville (2013), a trabalhabilidade pode ser definida como a quantidade de trabalho interno útil necessário à obtenção do adensamento total. Este trabalho interno útil é uma propriedade física inerente do concreto, sendo o trabalho ou energia suficiente para vencer o atrito interno entre as partículas individuais do concreto.

De acordo com Coutinho (1997), existem várias propriedades físicas que interferem na trabalhabilidade dos concretos. Pode-se citar: o ângulo de atrito, coesão, viscosidade (interferem na maior ou menor mobilidade da massa; a massa específica que interfere na compactação; a segregação e exsudação que interferem na estabilidade da mistura que constitui o concreto fresco). Em contrapartida, Metha e Monteiro (2014) apontam que essas propriedades físicas dos concretos são governadas por características físicas e químicas dos materiais que dão origem às misturas. A trabalhabilidade das misturas de concreto é afetada pelo consumo de água ou de cimento, pela granulometria do agregado e por outras características físicas, pelos aditivos, adições e pela perda de abatimento.

No que diz respeito ao consumo de água, misturas com consistência muito fluida tendem a segregar e exsudar, afetando adversamente o acabamento e no caso de misturas com consistência muito seca tornam-se difíceis de serem lançadas e adensadas, e o agregado graúdo pode segregar no lançamento. Com relação ao consumo do cimento, este se apresentar uma redução considerável, pode produzir misturas ásperas com acabamento insatisfatório. As

misturas de concreto com consumo muito elevado de cimento, ou alta proporção de finos, apresentam excelente coesão, no entanto tendem a ficar viscosas. Quando a quantidade de água de uma mistura de concreto é mantida constante, a incorporação de aditivos redutores de água aumenta o abatimento (aumenta a fluidez). (Mehta & Monteiro, 2014).

Partículas mais finas necessitam de mais água para molhagem de suas grandes superfícies específicas, enquanto a forma irregular e textura de um agregado anguloso demandam mais água que um agregado arredondado (Neville, 2013).

A trabalhabilidade é uma propriedade do concreto de difícil definição, sua natureza composta e sua dependência do tipo de construção e dos métodos de lançamento, adensamento e acabamento são as razões pelas quais nenhum método de ensaio pode ser projetado para medir a trabalhabilidade. O ensaio universalmente utilizado, que mede somente a consistência do concreto, é o ensaio de abatimento por tronco de cone, preconizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

3.10.2. Resistência à Compressão Axial

A resistência de um material é definida como capacidade para resistir à tensão sem se romper. No concreto a resistência está relacionada à tensão necessária para causar a ruptura, sendo definida como a tensão máxima que a amostra de concreto pode suportar.

A resistência à compressão do concreto geralmente é considerada como sendo o parâmetro mais importante. Diversas outras propriedades do concreto (módulo de elasticidade, estanqueidade

ou impermeabilidade e resistência a intempéries), estão relacionadas com a resistência à compressão. No projeto de estruturas de concreto o valor da resistência à compressão, aos 28 dias, é mundialmente aceito como um índice da resistência (Metha & Monteiro, 2014).

A resistência à compressão simples é a propriedade mecânica mais importante do concreto, não somente porque o concreto trabalha predominantemente à compressão, como também porque fornece outros parâmetros físicos que podem ser relacionados empiricamente à resistência à compressão. (Cordeiro, 2013).

Segundo Coutinho (1997), a resistência do concreto só não é influenciada pela resistência do agregado graúdo caso os seus valores sejam muito superiores aos valores de resistência do concreto, como por exemplo, valores de resistência das rochas maiores que 60 a 70 MPa. Caso contrário, a resistência dos agregados deve ser levada em consideração na avaliação dos fatores que influenciam a resistência final dos concretos.

A porosidade (volume relativo de poros ou vazios na pasta de cimento) influencia diretamente na resistência do concreto. Os vazios podem ser considerados como causa de diminuição da resistência. O agregado também pode afetar na capacidade de resistência do concreto, através da presença de falhas em sua estrutura, além de ser causador de micro fissuração na interface com a pasta de cimento (Neville, 2013).

Sekaran, Palaniswamy e Balaraju (2015), realizaram um estudo para avaliar o desempenho mecânico do concreto com agregado convencional (brita granítica) e 30 % de cinza volante em

substituição ao cimento Portland, em comparação ao concreto com substituição de 50 % de brita granítica por escória de aciaria, mantendo a mesma substituição no aglomerante, obteve aos 7, 28 e 90 dias valores de resistência superiores de 47, 15 e 12,04 % respectivamente em relação ao concreto com 100 % de agregado natural.

3.10.3. Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração dos concretos geralmente apresenta-se como uma característica mecânica secundária, uma vez que é sabido que o concreto não se apresenta como um bom material para resistir aos esforços de tração das estruturas. No entanto, ao se fazer um estudo criterioso das propriedades do concreto, principalmente quando são utilizados novos materiais, esta propriedade mecânica não pode ser desprezada.

Alizadeh *et al.* (1996), realizou uma pesquisa para avaliar o efeito da escória proveniente da produção do aço no concreto endurecido. Os resultados experimentais indicaram que os concretos confeccionados com a escória obtiveram valores mais elevados de resistência à compressão axial, resistência à flexão e módulo de elasticidade, em comparação a concretos confeccionados com os agregados naturais.

3.10.4. Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade determina o valor da rigidez de um material, isto é, avalia sua capacidade resistente, desta forma quanto maior é a sua resistência, mais esforço será necessário para deformar o material. A importância do limite de elasticidade em um projeto estrutural deve-se ao fato do mesmo representar a deformação

máxima permitida antes de o material adquirir deformação permanente (Metha & Monteiro, 1994).

O módulo de elasticidade do concreto é um dos parâmetros utilizados no cálculo estrutural e, sob o aspecto de projeto, é muito importante conhecer as propriedades elásticas do concreto para que se conheçam as deformações dos elementos estruturais que o concreto compõe.

Assim como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade do concreto depende da porosidade de suas fases (pasta, agregado e zona de transição). Assim sendo inúmeros comportamentos observados na resistência repetem-se no módulo de elasticidade. No caso do agregado, sua dimensão máxima, forma, textura superficial, granulometria, composição mineralógica e massa específica também podem influir no módulo de elasticidade em função da micro fissuração na zona de transição. Todavia, a porosidade é mais importante em virtude de estar ligada à sua rigidez e resistência (Metha & Monteiro, 1994).

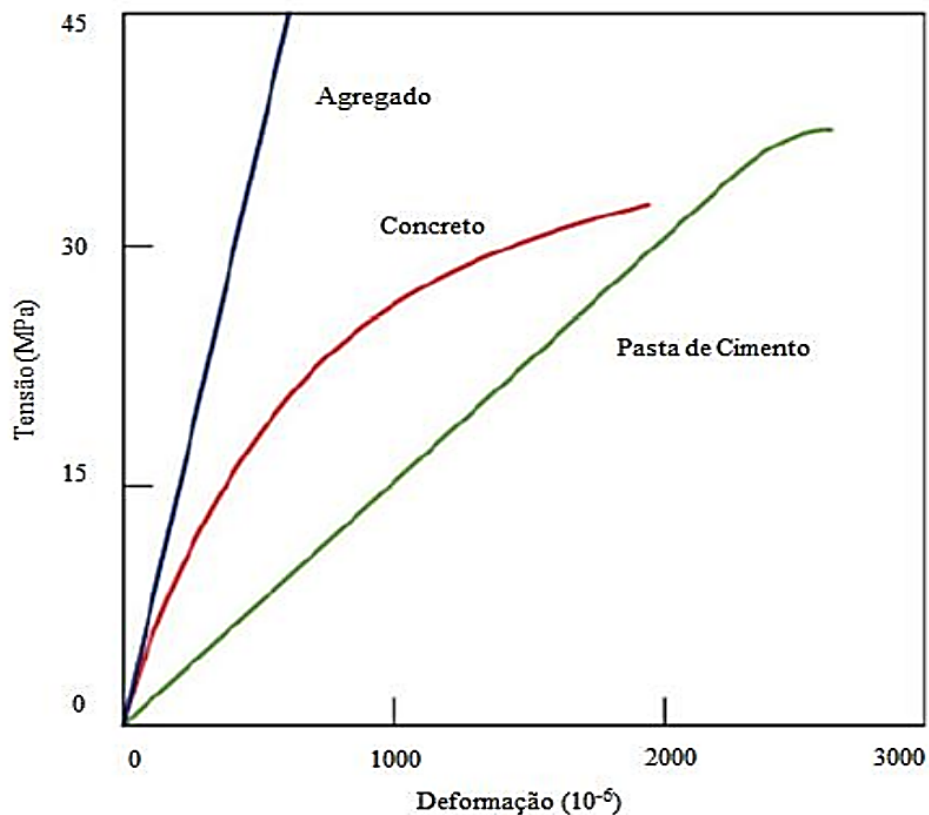
O concreto convencional é um material compósito que possui um meio aglomerante (cimento Portland) no qual são adicionados materiais granulares (agregados miúdos e graúdos), mais a água (Metha & Monteiro, 2008). Em função da sua composição heterogênea, o concreto possui um módulo de elasticidade diferente dos metais como o aço e o ferro, pois ele varia em função das matérias-primas que o compõe, diretamente relacionados com a resistência mecânica da peça estrutural.

O estudo do módulo de elasticidade do concreto é bastante complexo, pois este é um material elástico dentro de certos limites

(NEVILLE, 1997). Há dois tipos de deformações, que são a deformação elástica e plástica. Na primeira, as deformações desaparecem quando o carregamento é cessado; já na segunda, ocorre um deslocamento permanente dos átomos do material (Van Vlack, 1970).

Metha e Monteiro (2008), afirmam que a curvatura da relação tensão – deformação do concreto (Figura 2.5) deve-se à presença da zona de transição localizada entre o agregado graúdo e a pasta de cimento. Essa zona possui características que influenciam no módulo de elasticidade do concreto, tais como a presença de espaços vazios, concentração de hidróxido de cálcio e as microfissuras. A zona de transição está sujeita ainda à porosidade controlada por fatores como a relação água-cimento, distribuição granulométrica do agregado, interação química entre o agregado e a pasta de cimento e o grau de hidratação.

Figura 5. Comportamentos típicos de tensão – deformação da pasta de cimento, agregado e concreto.



Fonte: adaptado de Metha & Monteiro, 2008.

De acordo com a Figura 5, o agregado e a pasta de cimento submetido separadamente ao carregamento uniaxial apresentam comportamentos lineares, desta maneira é possível verificar a importância dos agregados durante a avaliação do módulo de elasticidade do concreto. Já o comportamento do concreto não permanece com as características lineares do agregado e da pasta de cimento e, na medida em que o carregamento aumenta a curvatura tende a ficar mais acentuada.

O módulo de elasticidade pode ser classificado em função do método adotado no ensaio realizado para sua determinação, esta classificação está dividida em estático, dinâmico, à flexão e a tração. Neste estudo empregou-se o módulo de elasticidade estático.

Kama *et al.* (2002), apresentou um estudo sobre o uso da EAF, que após passar por britamento e peneiramento, apresentou granulometria semelhante à do AGN. Os resultados mostraram que

as propriedades mecânicas do concreto endurecido, tais como compressão e flexão foram mais elevadas para o concreto com adição de escória em comparação ao concreto confeccionado apenas com agregado natural. Além disso, a utilização deste resíduo industrial melhorou as propriedades elásticas da peça estrutural, através do aumento no módulo de elasticidade e diminuição na razão de Poisson.

4. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desempenho mecânico do concreto de cimento Portland está diretamente relacionado às características de sua microestrutura e à interação entre seus constituintes. A literatura analisada demonstra que a zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta cimentícia representa uma das regiões mais críticas do material, uma vez que sua elevada porosidade e a presença de microfissuras influenciam significativamente a resistência, a rigidez e os mecanismos de ruptura do concreto.

Além da qualidade da interface agregado–matriz, as propriedades físicas dos agregados, tais como composição mineralógica, forma, textura superficial, granulometria, porosidade, resistência à abrasão e módulo de elasticidade, exercem influência direta tanto no comportamento do concreto no estado fresco quanto no estado endurecido. Essas características afetam a trabalhabilidade, a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade, evidenciando a importância da adequada seleção e caracterização dos agregados na produção de concretos com elevado desempenho.

A compreensão dos mecanismos microestruturais responsáveis pelo comportamento mecânico do concreto constitui uma ferramenta essencial para o aperfeiçoamento dos materiais constituintes, dos métodos de dosagem e das tecnologias de produção. Dessa forma, estudos que correlacionam a microestrutura com as propriedades mecânicas contribuem para o desenvolvimento de concretos mais resistentes, duráveis e adequados às crescentes exigências da construção civil.

Por fim, ressalta-se que a contínua investigação sobre a influência dos constituintes do concreto e da zona de transição permitirá avanços no entendimento do comportamento desse material compósito, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de soluções tecnológicas que promovam maior desempenho estrutural, durabilidade e sustentabilidade nas estruturas de concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIZADEH R, CHINI M, GHODS P, HOSEINI M, MONTAZER SH, SHEKARCHI M. **Utilization of electric arc furnace slag as aggregates in concrete – environmental issue.** Tehran: CMI Report, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. EN **Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregate.** ASTM C125. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. **NBR NM 51.** Rio de Janeiro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Terminologias. **NBR 9935**. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concreto – Especificação **NBR 7211**. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. **NBR NM 67**. Rio de Janeiro. 1998.

CALLISTER, W. D., Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada. **John Wiley & Sons, Inc.**, 2005.

KAMAL, M.; GAILAN, A.H.; HAATAN, A.; HAMEED, H. **Aggregate mode from industrial unprocessed slag**. In: Proceeding of the 6th international conference on concrete technology for developing countries, Amman, Jordan, 2002.

METHA, P. K; MONTEIRO, P. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

METHA, P. K; MONTEIRO, P. **Concreto: Microestrutura, propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

METHA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MONTEIRO, P. J. M. **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**. Berkeley, California, 1985. 153 p. Tese (Doutorado) – University of California, Berkeley.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução engenheiro Salvador E. Giamusso. 2º. edição, editora PINI, São Paulo, 1997.

SEKARAN, A.; PALANISWAMY, M.; BALARAJU, S. A Study on Suitability of EAF Oxidizing Slag in Concrete: An Eco-Friendly and Sustainable Replacement for Natural Coarse Aggregate. **“The Scientific World Journal**, 10. 1155/2015/972567, 1-8. Online publication date: 1-Jan-2015.

¹ Mestre em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Doutor em Química. Universidade Federal Rural da Amazônia. Capanema, Pará, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Doutor em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁴ Mestre em Processos Construtivos. Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁵ Mestre em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁶ Mestre em Engenharia Civil. Instituto Federal, de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. Belém, Pará, Brasil. E-mail [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁷ Bacharel em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁸ Doutor em Engenharia Civil. Universidade do Estado do Pará. Belém, Pará, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁹ Doutor em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

¹⁰ Doutor em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

¹¹ Doutor em Engenharia Civil. Instituto Federal, de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. Bragança, Pará, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

¹² Mestre em Engenharia Civil. Instituto Federal, de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. Bragança, Pará, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

¹³ Mestre em Processos Construtivos. Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)