

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA – CTEC
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUIZ GUSTAVO VIEIRA DA SILVA

**ESTUDO DO CISALHAMENTO PURO EM CONCRETOS COM GRADAÇÃO
FUNCIONAL**

Maceió – AL

2023

LUIZ GUSTAVO VIEIRA DA SILVA

**ESTUDO DO CISALHAMENTO PURO EM CONCRETOS COM GRADAÇÃO
FUNCIONAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: **Prof. Dr. Paulo Cesar Correia Gomes**

Coorientador: **Prof. Me. Karlisson André Nunes da Silva**

Maceió – AL

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S586e Silva, Luiz Gustavo Vieira da.
Estudo do cisalhamento puro em concretos com gradação funcional / Luiz Gustavo Vieira da Silva. - 2023.
49 f. : il.

Orientador: Paulo Cesar Correia Gomes.
Co-orientador: Karlisson André Nunes da Silva.
Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) –
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 44-49.

1. Concreto em camadas. 2. Gradação funcional. 3. Cisalhamento puro -
aderência. I. Título.

CDU: 621.965

LUIZ GUSTAVO VIEIRA DA SILVA

**ESTUDO DO CISALHAMENTO PURO EM CONCRETOS COM GRADAÇÃO
FUNCIONAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: **Prof. Dr. Paulo Cesar Correia Gomes**

Coorientador: **Prof. Me. Karlisson André Nunes da Silva**

Aprovado em 04 de outubro de 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes

Universidade Federal de Alagoas (UFAL) – Campus A.C. Simões

Prof. Me. Karlisson André Nunes da Silva

Universidade Federal de Alagoas (UFAL) – Campus A.C. Simões

Prof. Dr. Wayne Santos de Assis

Universidade Federal de Alagoas (UFAL) – Campus A.C. Simões

Prof. Me. Alexandre Nascimento de Lima

Universidade Federal de Alagoas (UFAL) – Campus A.C. Simões

À minha mãe, Iracema Maria Vieira da Silva...

Obrigado por tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente e acima de todos a minha mãe, Iracema Maria Vieira da Silva, que foi o pilar afetivo e emocional da família e nunca mediu esforços para que todos os quatro filhos tivessem uma educação de qualidade, e é com a finalização deste trabalho que ela pode ver todos os seus filhos graduados na Universidade Federal de Alagoas. Toda minha gratidão também para meu pai, Manoel Vieira da Silva, responsável por prover todo o necessário para que tivéssemos uma vida digna e suficiente, e que em toda sua brutalidade me ensinou a ser um homem honesto, bondoso e respeitoso. Gratidão aos meus irmãos: Leonardo, Larisse e Luiz Eduardo, aos quais procuro seguir os passos, sem a força e persistência de todos eles, nunca teria conseguido chegar até aqui.

Agradeço a meu falecido avô, Heleno Quirino, que foi um exemplo de homem em vida, que sempre ajudou a todos independente de qualquer coisa e que com certeza olha e protege toda a família.

Sou grato aos meus amigos de vida: Alessando, Daniel e Yghor, nossos momentos de diversão e risadas me ajudaram a ter uma vida mais leve. À minha namorada, Andreza Nunes, a quem tenho o prazer de dividir a vida e compartilhado os últimos momentos deste trabalho e ciclo tão importante.

Deixo meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, Professor Dr. Paulo César Correia Gomes, e ao meu coorientador, Professor Me. Karlisson André Nunes da Silva, assim como ao grupo MECOEFICON e toda equipe do Laboratório de Materiais, por todo aprendizado, dedicação e ajuda durante todo esse processo acadêmico, com certeza toda orientação que tive me fizeram crescer academicamente e profissionalmente.

Por fim, deixo minha gratidão a todos os companheiros de curso que dividiram essa luta e diminuíram a carga de trabalho e emocional advinda de todo esse processo.

RESUMO

O concreto é um dos materiais mais amplamente utilizados em todo o mundo. No entanto, devido à sua natureza heterogênea, não há garantia de que o material seja capaz de resistir adequadamente às diversas tensões a que pode ser submetido. A busca por maneiras de expandir e otimizar a aplicação do concreto tem sido tema de estudo em algumas pesquisas sobre concretos de graduação funcional, os quais apresentam um gradiente que pode ser contínuo ou em camadas. Esse conceito visa resolver desafios em diversas aplicações avançadas, nas quais dois ou mais materiais com características distintas são combinados. Este trabalho apresenta três tipos de concretos de graduação funcional em camadas, composto por duas ou três camadas, fazendo-se uso do concreto autoadensável com agregado natural (CAA) e dois tipos de concreto leve, que variam seu teor de espuma em 10% e 20% (CCE10 e CCE20). Para estes concretos foi proposto e realizado um ensaio de cisalhamento, em específico o cisalhamento puro, a fim de induzir no ensaio a presença apenas de tensões cisalhantes, com o objetivo de avaliar a resistência desses concretos ao cisalhamento e analisar a aderência entre as camadas. Verificou-se que o tempo de concretagem tem influência significativa para se chegar no concreto de graduação em camadas, concluiu-se que o intervalo de tempo de 1h20 min e 1h30 min entre as concretagens do CCE20 e do CAA é o tempo necessário para obter o concreto em camadas. Para o ensaio de cisalhamento puro nos concretos individuais CAA, CCE10 e CCE20, o resultado da resistência ao cisalhamento na primeira moldagem foi de, respectivamente, 9,41MPa, 6,45MPa e 4,93MPa, logo, pode-se observar a queda da resistência ao cisalhamento com o acréscimo de espuma (vazios). Para os concretos de graduação CCE1020 (2 camadas), CCE20CAA (2 camadas), CCE1020CAA (3 camadas), o resultado da resistência ao cisalhamento na primeira moldagem foi de, respectivamente, 5,84MPa, 5,16MPa e 5,31MPa, portanto, constatou-se que houve uma aderência maior entre as camadas onde ocorreu a ancoragem entre os poros e vazios dos concretos e que o intervalo de tempo entre as concretagens do CAA e do CCE20 diminui a aderência entre esses concretos.

Palavras-chave: concreto em camadas, graduação funcional. cisalhamento puro, aderência.

ABSTRACT

Concrete is one of the most widely used materials globally. However, due to its heterogeneous nature, there is no guarantee that the material can adequately withstand the various stresses to which it may be subjected. The quest to expand and optimize the application of concrete has been the subject of research in some studies on functional gradient concretes, which exhibit a gradient that can be continuous or layered. This concept aims to address challenges in various advanced applications where two or more materials with distinct characteristics are combined. This study presents three types of layered functional gradient concretes, comprising two or three layers, using self-consolidating concrete with natural aggregate (CAA) and two types of lightweight concrete, varying their foam content by 10% and 20% (CCE10 and CCE20). For these concretes, a shear test, specifically pure shear, was proposed and conducted to induce only shear stresses in the test. The goal was to evaluate the shear resistance of these concretes and analyze the adhesion between the layers. It was observed that the casting time significantly influences the achievement of layered gradient concrete. It was concluded that the time interval of 1 hour and 20 minutes to 1 hour and 30 minutes between the castings of CCE20 and CAA is the necessary time to obtain layered concrete. For the pure shear test on the individual concretes CAA, CCE10, and CCE20, the shear resistance results in the first molding were 9.41 MPa, 6.45 MPa, and 4.93 MPa, respectively, indicating a decrease in shear resistance with the addition of foam (voids). For the CCE1020 (2 layers), CCE20CAA (2 layers), and CCE1020CAA (3 layers) gradient concretes, the shear resistance results in the first molding were 5.84 MPa, 5.16 MPa, and 5.31 MPa, respectively, indicating a higher adhesion between the layers where anchoring occurred between the pores and voids of the concretes and that the time interval between the castings of CAA and CCE20 reduces the adhesion between these concretes.

Keywords: layered concrete, functional gradient, pure shear, adhesion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Características dos MGF.....	12
Figura 2 - Ilustração esquemática de (a) concreto em camadas e (b) concreto de graduação contínua.	13
Figura 3 – Tensão de cisalhamento.	14
Figura 4 - Mecanismo de transferência de esforços de cisalhamento em uma junta rugosa	16
Figura 5 - Cisalhamento por compressão diagonal	17
Figura 6 - Esquema de vários métodos de teste para determinar a força de ligação da interface.	19
Figura 7 - Fissuração diagonal e ruptura teórica.	20
Figura 8 - Esquema do cubo de superfície dupla de 150mm com placas de aço onde é incidido o carregamento	22
Figura 9 - Ensaio de cisalhamento puro.	22
Figura 10 - (a) Concretagem da camada de substrato (b) Esquema do corpo de prova com duas camadas destacando a presença de junta fria.....	24
Figura 11 - Fluxograma para metodologia de produção e obtenção do CGF.	26
Figura 12 - Betoneira de 400L utilizada.....	28
Figura 13 - Produção da espuma para posterior colocação nos concretos leve.....	29
Figura 14 - Configuração do teste de cisalhamento puro nos concretos individuais e de graduação	30
Figura 15 - Corte de 1,5cm de profundidade na parte superior do corpo de prova.	31
Figura 16 - Ensaio de cisalhamento puro em corpo de prova de CAA.	31
Figura 17 - Concretagem de amostras CCE20CAA para verificação do tempo necessário para se obter o CGF em camadas. Concretagem das camadas no intervalo de tempo entre: (a) 20 min e 30 min; (b) 40 min e 50 min; (c) 50 min e 60 min; (d) 60 min e 70 min; (e) 70 min e 80min; (f) 80 min e 90 min.	33
Figura 18 - Comparativo entre os concretos individuais e de graduação.....	36
Figura 19 – (a) Corpo de prova de referência 01 CCE1020 rompido. (b) Vista da seção de ligação entre o CCE10 e o CCE20 onde houve o rompimento.	37
Figura 20 - Corpo de prova réplica 02 CCE1020 rompido, com presença de fissura.	38
Figura 21 - Corpo de prova de referência 01 CCE20CAA rompido.	38
Figura 22 - Corpo de prova de referência 02 CCE1020CAA rompido.	39
Figura 23 - Corpo de prova réplica 03 CCE1020CAA rompido.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos concretos de referência	27
Tabela 2 – Quantidade de corpos prova de CGF produzidos para o ensaio de cisalhamento puro.....	30
Tabela 3 – Resultado do ensaio de espalhamento.....	32
Tabela 4 – Resultado do ensaio de caixa L.....	32
Tabela 5 - Tensão de cisalhamento em MPa na 1ª moldagem e réplica dos concretos individuais	35
Tabela 6 - Tensão de cisalhamento em MPa na 1ª moldagem e réplica dos concretos com graduação.....	35

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivo.....	10
1.2 Justificativa.....	10
1.3 Estrutura do trabalho	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Concreto com graduação funcional.....	12
2.2 Cisalhamento.....	14
2.2.1 Cisalhamento em concretos.....	15
2.2.2 Técnicas ensaios de cisalhamento.....	17
2.2.3 Cisalhamento puro.....	21
2.3 Aderência entre concretos.....	23
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	25
3.1 Considerações iniciais	25
3.2 Metodologia.....	25
3.3 Seleção e caracterização dos materiais.....	26
3.4 Dosagem e produção dos concretos.....	27
3.5 Ensaios do concretos no estado fresco.....	29
3.6 Ensaios do concretos no estado endurecido.....	29
4. RESULTADOS	32
4.1 Produção do CGF em camadas e modelagem do ensaio de cisalhamento puro.....	32
4.2 Produção do CGF em camadas e modelagem do ensaio de cisalhamento puro.....	32
4.3 Resultados do ensaio de cisalhamento puro.....	34
4.4 Análise visual da ruptura e seção de ligação dos concretos.....	37
5. CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	43

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no planeta, é um material compósito que, por natureza, admite modificação de sua composição – embora isto altere suas propriedades tanto no estado fresco como no endurecido. Contudo, a heterogeneidade do concreto não garante que o material resista de forma adequada aos diferentes esforços solicitantes aos quais pode ser submetido.

De acordo com Carneiro et. al (2012), material com gradação funcional (MGF) é aquele que tem uma composição de pelo menos duas camadas, em um gradiente que pode ser contínuo ou em camadas. Este princípio tem como objetivo a solução para muitas aplicações avançadas, na qual dois ou mais materiais com propriedades distintas são unidos, de modo que este tipo de material apresenta um leque vasto de aplicações em todas as áreas da ciência e em especial na engenharia.

Peças de concreto estão sujeitas a tensões e existem locais com predominância de esforços previamente conhecidos, possibilitando, assim, o uso desta técnica para colocar - nas regiões destes esforços - composições de concretos que melhor atendam tais solicitações. Nesse sentido, estudos já foram realizados com o intuito de melhorar suas características ou de incluir outros materiais dentro do mesmo sem que este perca suas qualidades. O caminho na tentativa de ampliar e tornar mais eficiente a aplicação de concreto tem sido objeto de estudo de algumas pesquisas em concretos com gradação funcional (CGF), (LIU et. al., 2018; STIEDER et. al. 2018).

Segundo Cusson et al. (2012), elementos de concreto armado sujeitos a cargas que não geram momentos fletores podem falhar por cisalhamento puro, o que pode levar à ruptura abrupta do elemento. Além disso, a resistência ao cisalhamento puro do concreto é influenciada por diversos fatores, como a taxa de cisalhamento, a presença de armadura transversal e o tamanho e forma do agregado (Muttoni e Schwartz, 2012).

Conforme exposto anteriormente, uma das formas para se obter a gradação funcional nas estruturas de concreto é por meio da sobreposição de camadas, conseqüentemente a propriedade da aderência entre essas camadas influencia significativamente na qualidade final desses elementos.

No caso de elementos de gradação funcional de concreto, visto que esses elementos possuem geometrias complexas que podem afetar a distribuição de tensões no material, é importante compreender a influência da ligação entre as camadas na resistência ao cisalhamento

puro.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

- Analisar, através de ensaios em laboratório, o comportamento mecânico de corpo de prova de concreto com gradação funcional submetido ao esforço de cisalhamento puro.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinação do tempo para sobreposição das camadas dos concretos;
- Condução de ensaio para verificação de ruptura em concretos com gradação funcional submetidos ao cisalhamento puro;
- Entendimento do comportamento mecânico da seção de ligação em elementos de concreto com gradação funcional submetido ao esforço de cisalhamento puro.

1.2 Justificativa

Primeiramente, o estudo do cisalhamento em elementos estruturais de concreto é de fundamental importância para a compreensão do comportamento mecânico dessas estruturas. Segundo Momayez, et al (2004), um dos estados de tensão mais comuns encontrados na prática é a tensão de cisalhamento; este estado de tensão pode existir sob deformação dependente do tempo, por exemplo, devido à retração ou sob carregamento, o que destaca a importância do estudo do comportamento ao cisalhamento em estruturas de concreto.

Vários métodos de cisalhamento direto foram propostos por pesquisadores anteriores (RAMEY E STRICKLAND, 1984; BEER et al. 1984). Contudo, para Beushausen e Alexander (2008), a desvantagem dos métodos mais comuns em ensaios de cisalhamento é a ocorrência de um momento de flexão da interface devido a excentricidade. Portanto, neste trabalho foi realizado nos corpos de prova de concreto com gradação funcional em estudo o ensaio de cisalhamento puro proposto por Momayez, et al (2004).

Finalmente, o estudo do cisalhamento em elementos de gradação funcional de concreto pode levar a um melhor entendimento da interação entre as propriedades do concreto e as forças externas, o que pode permitir a concepção de estruturas de concreto mais eficientes e seguras.

Por todas essas razões, o estudo do cisalhamento em elementos de gradação funcional de concreto é um tema relevante e atual na área de engenharia civil, com implicações importantes para o projeto e a construção de estruturas de concreto mais seguras, eficientes e econômicas.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho será dividido em 05 capítulos, sendo eles:

Capítulo 1 – Apresenta a Introdução, Justificativa e Objetivos do trabalho buscando um resumo conciso do conteúdo;

Capítulo 2 – Este capítulo traz um estudo bibliográfico sobre concreto com gradação funcional, seu histórico e propriedades. Também serão abordados conceitos fundamentais de cisalhamento, ensaios de cisalhamento em concreto, tendo como foco cisalhamento puro - e o ensaio proposto para o presente trabalho, além de discorrer sobre aderência entre concretos;

Capítulo 3 – O capítulo 3 apresenta o programa experimental, mostrando o método e materiais utilizados;

Capítulo 4 – Apresenta os resultados obtidos e as respectivas análises;

Capítulo 5 – São as Considerações Finais e Conclusão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto com gradação funcional

O concreto é um material utilizado em todo o mundo e inúmeras pesquisas já foram realizadas com este produto, na tentativa de melhorar suas características ou atender a algumas aplicações em particular.

Segundo Auad et al. (2018), os MGF são materiais compósitos compostos por duas ou mais fases, sendo mais comuns cerâmicas e metais, embora outras misturas sejam possíveis. Sua principal característica é uma variação contínua e suave de sua composição em sua espessura, conforme exemplificado na Figura 1. Dessa maneira, o concreto com gradação funcional surge como uma alternativa para diversas aplicações na construção civil, pois estes materiais têm a composição e/ou estrutura variando de forma gradual dentro do próprio material, resultando em alterações correspondentes em suas propriedades (SILVA; DIAS; RIBEIRO, 2016).

Figura 1 - Características dos MGF

Material	Exemplo	Com gradação funcional	Sem gradação funcional
Função / Propriedade	① Resistência mecânica ② Resistividade térmica		
Estrutura / Textura	Elementos constituintes: Cerâmica (○) Metal (●) Fibra (◇+) Micropore (○)		

Fonte: adaptada de KOIZUMO (1996).

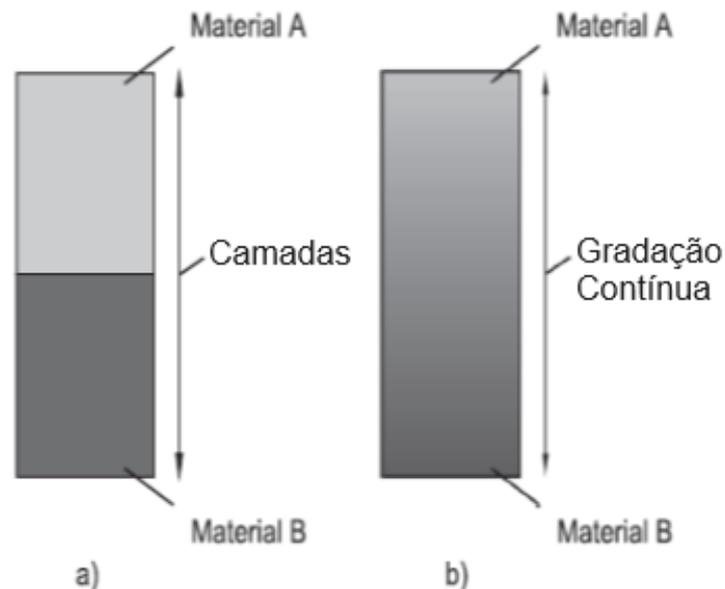
De acordo com Miyamoto et al. (1999), a utilização do conceito de MGF não é recente; há diversos materiais com gradação funcional, desde os naturais como o osso humano e o bambu, assim como os materiais produzidos em laboratório, a fim de otimização. Um destes MGF é o concreto com gradação de porosidade desenvolvido por Silva, Dias e Ribeiro (2016).

Em relação aos concretos com gradação funcional estudados nos trabalhos de Gan et al. (2015), observou-se que o concreto resultante da gradação é influenciado negativamente pela

diferença entre as duas resistências do concreto, pois a parte do corpo de prova (CPs) com o concreto de menor resistência caracterizou a resistência do material total. Ademais, Aylie et al. (2015) mostrou que para a situação no qual são utilizadas duas resistências diferentes no concreto de gradação funcional, a parte de maior resistência do concreto precisará ser atribuída às camadas em que a tensão é dominante.

Torelli, Fernández e Less (2020) referem que o uso do concreto pode, portanto, ser otimizado através da classificação funcional, em uma gradação contínua ou em camadas (Figura 2). Em materiais graduados funcionalmente, a composição da mistura é variada ao longo da geometria de um elemento para adequar as propriedades do material às necessidades locais. Isso permite que vários requisitos sejam atendidos, empregando racionalmente uma determinada composição de material apenas quando ela contribui significativamente para uma ou várias funções do elemento.

Figura 2 - Ilustração esquemática de (a) concreto em camadas e (b) concreto de gradação contínua.



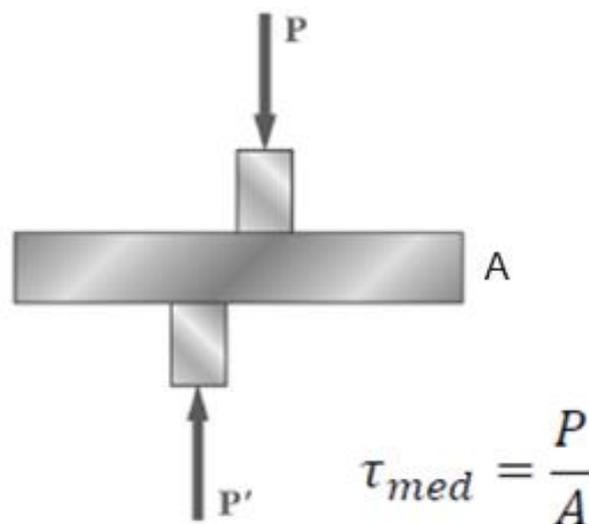
Fonte: Adaptado de Torelli; Fernández; Less, (2020)

Visto que uma das formas de se obter a gradação em concretos é por meio da sobreposição de camadas ou pela separação do elemento em lâminas de diferentes propriedades, e uma vez que a propriedade da resistência ao cisalhamento está diretamente ligada a capacidade das camadas do material se opor às forças transversais a que são submetidas, se faz necessário o estudo da resistência ao esforço de cisalhamento nesses concretos.

2.2 Cisalhamento

Cisalhamento é um tipo de tensão que ocorre quando camadas de um material são deslizadas umas sobre as outras em direções opostas e paralelas a um plano ou superfície do objeto. Essa tensão causa uma deformação no material, resultando em uma mudança de sua forma ou dimensão. Segundo a teoria do cisalhamento, a força de cisalhamento em um material é proporcional à área da seção transversal do material e à tensão de cisalhamento. A tensão de cisalhamento é a razão entre a força de cisalhamento e a área da seção transversal (Gere & Timoshenko, 1997).

Figura 3 – Tensão de cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Bordignon (2022).

Existem várias formas de cisalhamento, incluindo o cisalhamento puro e o cisalhamento simples. No cisalhamento puro, a força é aplicada perpendicularmente à superfície do material, enquanto no cisalhamento simples, a força é aplicada em um ângulo para a superfície do material (HIBBELER, 2010).

Gere & Timoshenko (1997) indicam que o estudo do cisalhamento é importante para entender a resistência e a durabilidade dos materiais. Materiais com boa resistência ao cisalhamento podem suportar forças tangenciais sem se deformar significativamente ou falhar. A resistência ao cisalhamento é influenciada por várias propriedades do material, como sua dureza, ductilidade e módulo de elasticidade.

O cisalhamento pode causar uma série de efeitos em diferentes materiais, dependendo de sua resistência e elasticidade. Por exemplo, em um sólido homogêneo e isotrópico, o

cisalhamento pode resultar em um deslocamento angular das partículas do material em relação a uma seção transversal perpendicular à direção da força aplicada (BEER et al., 2008). Essa deformação angular é conhecida como deformação de cisalhamento ou deformação tangencial.

Em materiais frágeis, como vidro e cerâmica, o cisalhamento pode causar uma falha catastrófica, levando à fratura do material (GERE & TIMOSHENKO, 1997). Por outro lado, materiais mais dúcteis, como metais, podem suportar uma carga maior antes de falhar em cisalhamento. A resistência ao cisalhamento pode ser medida por meio de testes de cisalhamento, como o teste de cisalhamento em compressão direta, em que uma força é aplicada em direções opostas em uma amostra de material (HIBBELER, 2010). Além disso, o cisalhamento é uma das principais formas de deformação em rochas, especialmente em rochas sedimentares que possuem camadas distintas. A deformação por cisalhamento pode levar à formação de falhas geológicas, que são zonas de fratura nas rochas causadas pela deformação em cisalhamento (DAVIS & REYNOLDS, 1996).

Em conclusão, o cisalhamento é um esforço importante em diversos campos da engenharia e da ciência dos materiais. O estudo do cisalhamento permite entender como os materiais se deformam e falham sob tensão tangencial, e como a resistência ao cisalhamento é influenciada pelas propriedades dos materiais (GERE & TIMOSHENKO, 1997).

2.2.1 Cisalhamento em Concretos

Para Ehsani et al (2004), o cisalhamento pode ocorrer em uma variedade de elementos estruturais, como em vigas e lajes. Em paralelo a isso, Neville e Brooks (2010) informam que o cisalhamento é um dos mecanismos responsáveis pela resistência à ruptura em elementos de concreto, e pode ocorrer em diferentes regiões da seção transversal do elemento. Portanto, é de extrema importância compreender o cisalhamento para projetar objetos que possam resistir a essas forças e evitar a falha estrutural. O conhecimento sobre as propriedades de cisalhamento dos materiais é fundamental para a concepção e construção de estruturas resistentes e duráveis.

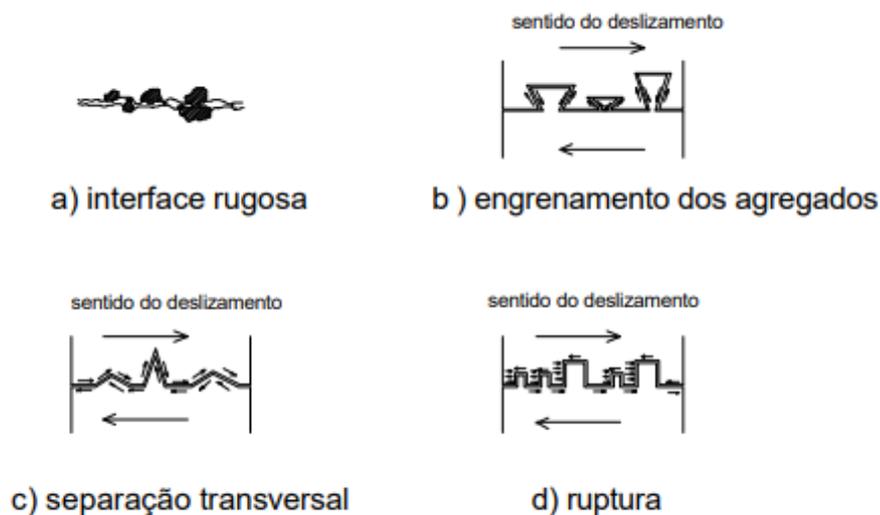
A resistência ao cisalhamento do armado é influenciada por diversos fatores, como a taxa de cisalhamento, o tamanho e forma do agregado graúdo, a presença de armadura transversal e a resistência à tração do concreto. De acordo com Balay et al. (2018), a resistência ao cisalhamento do concreto armado é afetada pelo modo de ruptura, que pode ser por compressão diagonal, por deslizamento da armadura transversal ou por cisalhamento frágil.

Araújo (1997) descreve de forma geral quais os mecanismos que afetam transferências de cisalhamento em interfaces de concreto, o que explica que eles ocorrem de duas maneiras

principais: por superfície de contato e por transferência pela armadura transversal. Nomeadamente, as transferências de contato são: por adesão ou aderência (tem influência se não houver deslocamento); por atrito (surgem a partir da aplicação de forças externas ou reações de ancoragem perpendiculares à interface); por ação mecânica (engrenamento mecânico dos agregados depende da rugosidade das interfaces).

Um modelo de transferência de tensão de cisalhamento nas interfaces de superfícies rugosas de concreto sem reforço de costura, com base na interação entre agregados, foi apresentado por Divakar; FAphitis (1992). Eles separaram o mecanismo de transferência de tensão em quatro componentes: atrito, engrenamento de agregados graúdos, separação transversal entre as partes e ruptura de argamassa e agregados. Na Figura 4 é mostrado, esquematicamente, o funcionamento de cada mecanismo.

Figura 4 - Mecanismo de transferência de esforços de cisalhamento em uma junta rugosa



Fonte: DIVAKAR; FAFITIS (1992).

Araújo (1997) também explica como a resistência da interface do concreto é afetada por fatores específicos, a saber:

- resistência do concreto: concretos com maior resistência a compressão mostram maior resistência ao cisalhamento nas interfaces concreto;
- aderência da interface: elementos de concreto completamente em contato se comportam como concretos monolíticos, porém unidos de forma não coesa adquirem baixa resistência ao cisalhamento;
- rugosidade das superfícies de contato: quanto maior a rugosidade, maior resistência ao

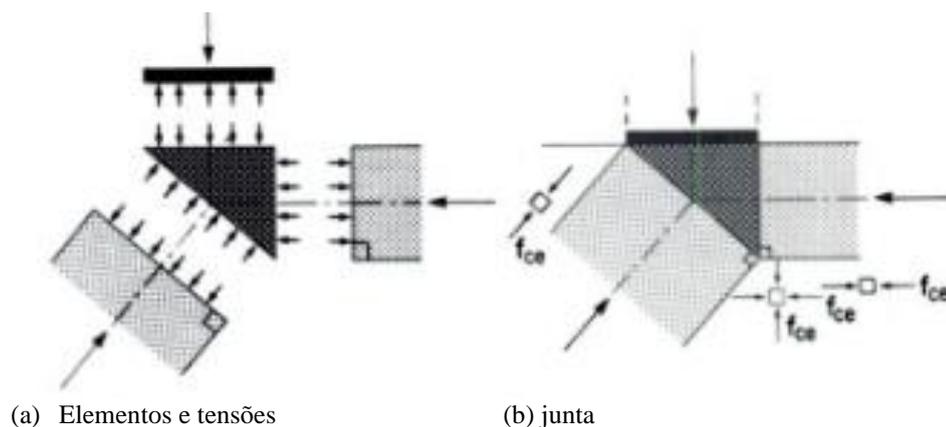
deslocamento;

d) chaves de cisalhamento: adesão e rugosidade e rugosidade semelhante das interfaces;

e) armadura transversal: tem maior influência no estado limite de resistência (em deslocamentos maiores) porque seu efeito (dowel effect) é "ativado".

Diversos estudos têm sido realizados para compreender melhor o comportamento do concreto em cisalhamento. Um dos modelos mais utilizados para descrever o comportamento do concreto em cisalhamento é o modelo de falha por compressão diagonal, como mostrado na Figura 5, proposto por Muttoni et al. (1997). Este modelo descreve o cisalhamento em concreto como uma falha por compressão diagonal que ocorre no plano inclinado em relação ao eixo principal da força de cisalhamento. Em resumo, o estudo do comportamento do concreto em cisalhamento é importante para garantir a segurança e eficiência de estruturas de concreto.

Figura 5 - Cisalhamento por compressão diagonal



Fonte: Muttoni et al. (1997).

2.2.2 Técnicas de ensaios de Cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento em concretos são fundamentais para o estudo do comportamento estrutural de elementos de concreto sujeitos a cargas transversais. Esses ensaios permitem avaliar a resistência ao cisalhamento, identificar os mecanismos de falha e entender como os diferentes parâmetros influenciam o comportamento estrutural. Existem diferentes tipos de ensaios de cisalhamento em concreto, cada um com suas particularidades e aplicabilidades, tais como o ensaio de cisalhamento direto, o ensaio de compressão diagonal, o ensaio de flexão com corte na biela e o ensaio de cisalhamento em vigas.

Araújo (1997) afirma que ao longo dos anos inúmeras pesquisas foram realizadas visando determinar a resistência ao cisalhamento de interfaces de concreto. Nessas pesquisas

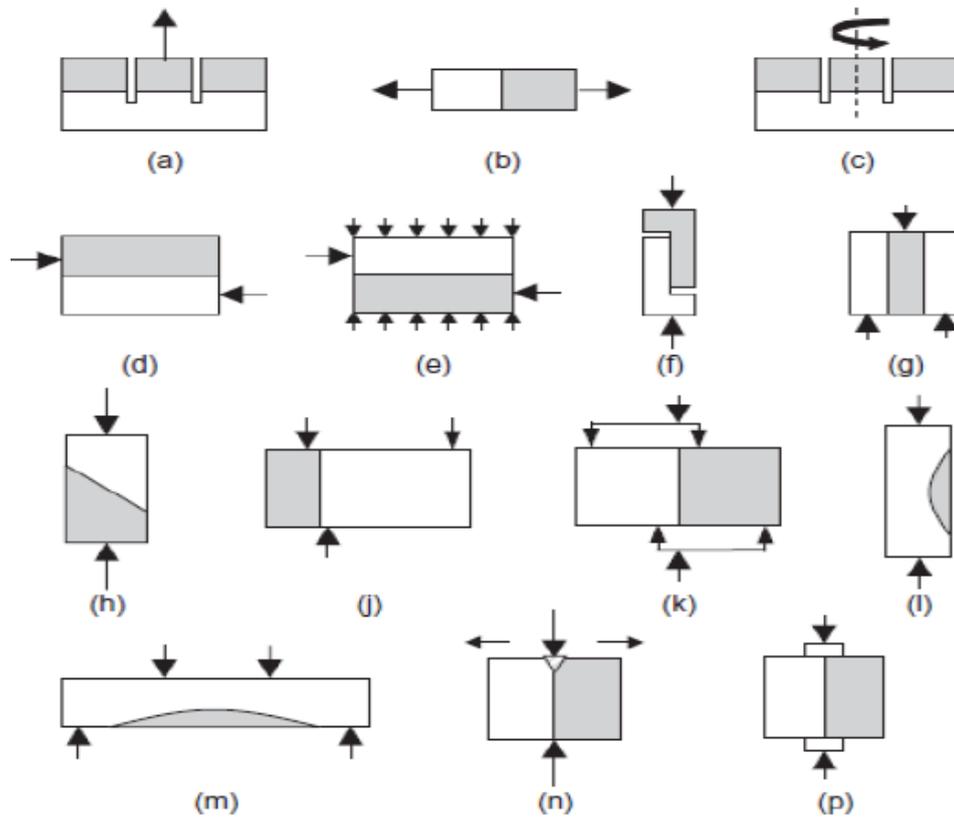
eram empregados dois tipos de ensaios: ensaios de cisalhamento direto e ensaios em vigas biapoiadas. Os ensaios de cisalhamento direto eram realizados em modelos com interface previamente fissurada ou em modelos monolíticos. Em cada um desses ensaios, diferentes tipos de formas, dimensões e condições de carregamento foram empregados.

Segundo Frosch (1977), o ensaio de cisalhamento em vigas é um dos mais utilizados para avaliar a resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado. Nesse ensaio, uma viga é submetida a um carregamento transversal, e a resistência ao cisalhamento é avaliada por meio da carga máxima suportada pela viga antes da falha por cisalhamento. O ensaio de cisalhamento em vigas permite avaliar o comportamento do concreto na região próxima à superfície de cisalhamento, identificar os mecanismos de falha e entender como diferentes parâmetros, como a taxa de cisalhamento, o tamanho e forma do agregado e as propriedades do material, afetam a resistência ao cisalhamento do concreto.

Além disso, existem diversas metodologias para a realização de ensaios de cisalhamento em concreto, cada uma com suas vantagens e limitações. Segundo Elwi e El-Gamal (2006), o ensaio de compressão diagonal é um método eficiente para avaliar a resistência ao cisalhamento de elementos de concreto com baixa altura, como lajes e placas, enquanto o ensaio de flexão com corte na biela é mais adequado para elementos com altura elevada, como pilares e vigas.

Vale ressaltar que ensaios de cisalhamento são bastante utilizados para se avaliar a superfície de ligação entre diferentes concretos. Segundo Beushausen e Alexander (2008), uma grande variedade de parâmetros do material e condições ambientais podem influenciar a qualidade da aderência entre concretos e, em geral, parece difícil interpretar as medidas de resistência da ligação em termos de parâmetros de teste individuais. Uma ampla gama de possíveis configurações de teste foi desenvolvida para testes de laboratório conforme ilustrado na Figura 6; essas configurações consideram principalmente o tipo de teste a ser realizado para avaliação da aderência entre os concretos e a geometria adotada para os corpos de prova. Métodos de teste de ligação comuns incluem testes de cisalhamento, torção e tensão da interface.

Figura 6 - Esquema de vários métodos de teste para determinar a força de ligação da interface.



Fonte: Beushausen e Alexander (2008)

Em seu estudo, Beushausen e Alexander (2008) classificam todos os testes de determinação da força de ligação explicitados na Figura 6. Os testes de cisalhamento, os quais são de interesse para o presente trabalho, são classificados pelos autores da seguinte forma:

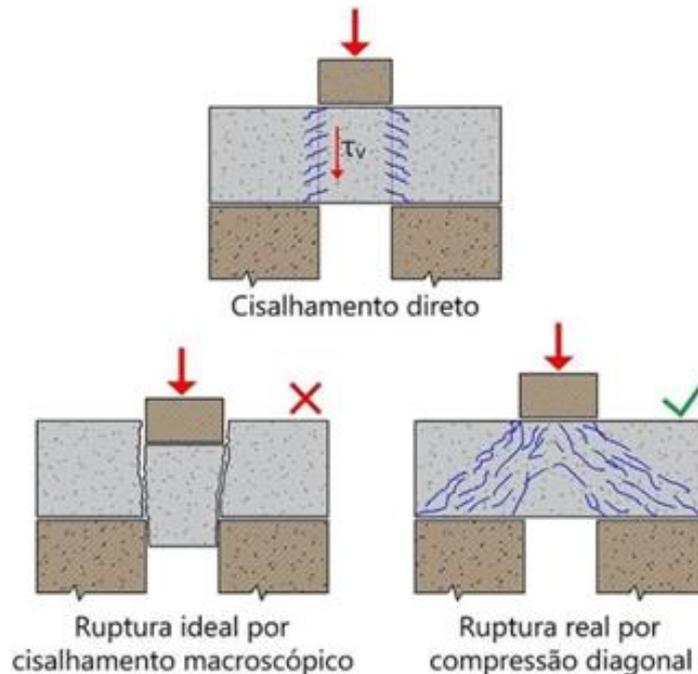
- Fig. 6 (d) - Testes de ligação de cisalhamento comuns aplicam uma força paralela à interface;
- Fig. 6 (f) - Método de teste de ligação de cisalhamento modificados;
- Fig. 6 (g) - Teste push-out: tem a desvantagem de ter duas interfaces, podendo ser complexo de ser realizado na prática;
- A Fig. 6 (h) - Teste de cisalhamento inclinado: mede a resistência de união sob uma combinação de cisalhamento e compressão. Vários pesquisadores indicaram deficiências deste teste em relação às condições de carga irrealistas e ao grande número de parâmetros que podem afetar os resultados do teste;
- Fig. 6 (k) - Método de teste para a resistência ao cisalhamento da interface, no qual a

interface é teoricamente sujeita a forças de cisalhamento puras (desenvolvido pela Federação Internacional de Concreto Estrutural – FIB).

Ainda segundo Beushausen e Alexander (2008), os valores de resistência ao cisalhamento da interface obtidos por diferentes métodos de teste podem diferir substancialmente, pois os resultados do teste dependem do tamanho da amostra, configuração do teste, taxa de carga e assim por diante.

Segundo Fusco (1995), por muito tempo foram realizados ensaios do tipo ilustrado na Figura 7. No entanto, a ruptura macroscópica que ocorre no elemento ensaiado não é uma ruptura de deslizamento, como acontece com os metais. Em virtude da baixa resistência à tração no concreto, dá-se a fissuração diagonal nos planos onde atuam as tensões principais de tração, que diminuem a resistência à compressão diagonal do concreto.

Figura 7 - Fissuração diagonal e ruptura teórica.



Fonte: Adaptado de Fusco (1995).

A configuração de teste realizado nos concretos com graduação no presente trabalho de conclusão de curso será semelhante com o teste mostrado na Fig. 6 (g), realizando-o de tal forma que não permita existir excentricidade para que o teste de push-out citado anteriormente seja um teste de cisalhamento puro.

Por fim, é importante ressaltar que a realização de ensaios de cisalhamento em concreto é fundamental para o desenvolvimento de modelos teóricos capazes de prever o comportamento

estrutural de elementos de concreto sujeitos a cargas transversais. Segundo Muttoni e Schwartz (2012), a comparação entre os resultados experimentais obtidos em ensaios de cisalhamento e os valores previstos pelos modelos teóricos é essencial para validar e aprimorar esses modelos.

2.2.3 *Cisalhamento puro*

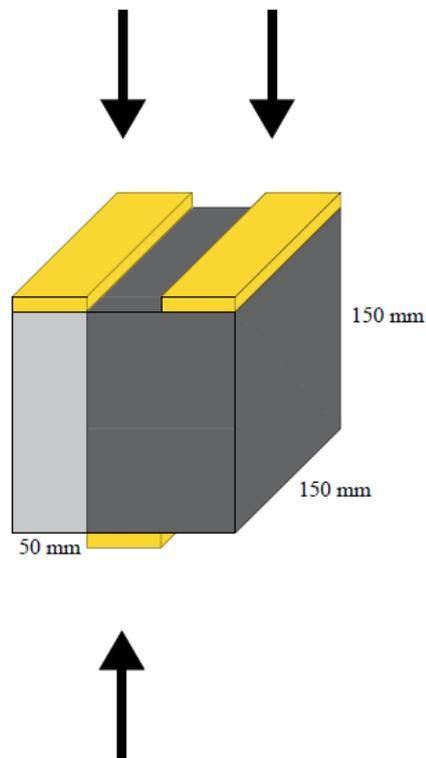
Um elemento estrutural é submetido ao esforço de cisalhamento puro quando sofre a ação de uma força cortante (e nenhum outro esforço solicitante), ou seja, produzida quando forças aplicadas tendem a deslizar uma seção relativamente à outra, e nesse elemento só se manifestam componentes de tensões cisalhantes (TIMOSHENKO; GERE, 1983).

O tipo de deformação gerada por esse tipo de esforço é chamada de deformação coaxial, pois as linhas ao longo dos eixos principais de deformação mantêm a mesma orientação de seu estado indeformado, logo, também é chamada de deformação não rotacional.

O cisalhamento puro é um tipo específico de esforço transversal que ocorre em elementos de concreto sujeitos a cargas que não geram momentos fletores. Segundo Muttoni e Schwartz (2012), o cisalhamento puro é um dos modos de falha mais críticos em elementos de concreto armado, e pode levar à ruptura abrupta do elemento. Para Neville e Brooks (2010), a resistência ao cisalhamento puro do concreto é geralmente menor do que a resistência ao cisalhamento em elementos sujeitos a momentos fletores, como vigas e lajes.

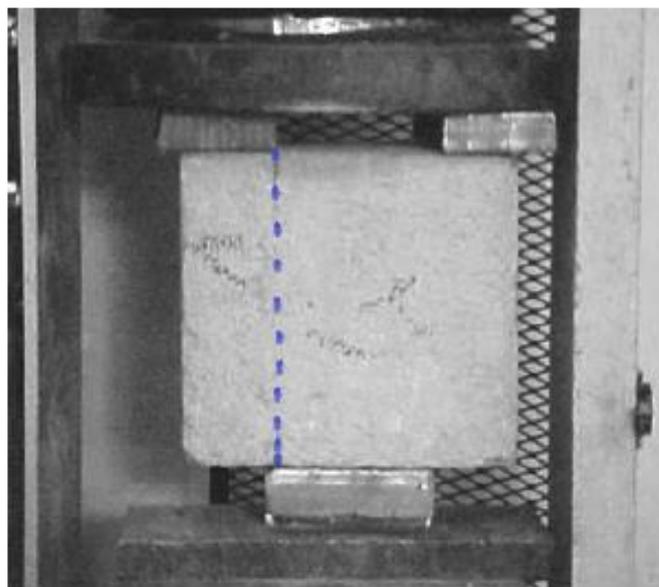
Um exemplo deste tipo de ensaio foi abordado no estudo feito por Momayez et al. (2004), que, em resumo, se trata de um teste de cisalhamento puro em um cubo de superfície dupla com dimensões 150 mm x 150 mm x 150 mm com duas placas de aço de 50 mm apoiadas na parte superior do cubo e uma outra placa de mesma dimensão na parte inferior, conforme mostrado na Figura 8. Desta forma, as placas estão com as extremidades perpendiculares umas às outras. Uma vez aplicada a carga na parte inferior, os esforços são transmitidos pelo corpo de prova para a região em contato que atravessa o elemento (linha pontilhada conforme explicitado na Figura 9) até chegarem na outra extremidade, onde está localizada a terceira placa.

Figura 8 - Esquema do cubo de superfície dupla de 150mm com placas de aço onde é incidido o carregamento



Fonte: Autor. (2023)

Figura 9 - Ensaio de cisalhamento puro.



Fonte: MOMAYEZ, et al. (2004).

2.3 Aderência entre concretos

Para Pinheiro (2004), aderência é a propriedade que impede o escorregamento ou a separação entre o concreto e outro material, podendo ser esse material um outro concreto. Nesse sentido, para alcançar as propriedades de trabalhabilidade e mecânicas ao se fazer da gradação funcional entre diferentes concretos, torna-se imprescindível o estudo e aprimoração da aderência entre concretos. Para Mohamed et al. (2015), o tipo de rugosidade da superfície na interface influencia a coesão, o atrito e a resistência de união entre as camadas de concreto.

Segundo Doria (2014), procedimentos como lançamento do concreto e cura devem ser meticulosamente conduzidos, até que se desenvolva uma resistência de união suficientemente elevada para que ocorra a acomodação das tensões. Quando se trabalha com aderência entre concretos de diferentes idades, é imprescindível conhecer acerca da ligação entre concreto novo e concreto velho. As incompatibilidades em relação às deformações entre concretos de diferentes idades geram tensões na interface de ligação, pois o concreto de recuperação e o concreto de substrato sofrerão diferentes deformações por retração (DORIA, 2014). Pode-se inferir a partir do conceito de Li e Li (2011) que a dificuldade de aderência entre concreto novo e concreto velho seria a incompatibilidade dimensional, o que pode acarretar em problemas quanto à durabilidade da ligação.

Como exposto por Souza e Ripper (2005), a perda de aderência pode ocorrer, em concretos de diferentes idades, na interface de duas concretagens. Este efeito pode acarretar em consequências ruins para a estrutura. Como ressaltado por Doria (2014), é importante destacar a ação do tempo como fator preponderante para a qualidade da aderência entre concretos de diferentes idades. Segundo Souza e Ripper (2005), quanto maior o tempo entre uma concretagem e outra, maiores serão as dificuldades quanto a qualidade dessa união.

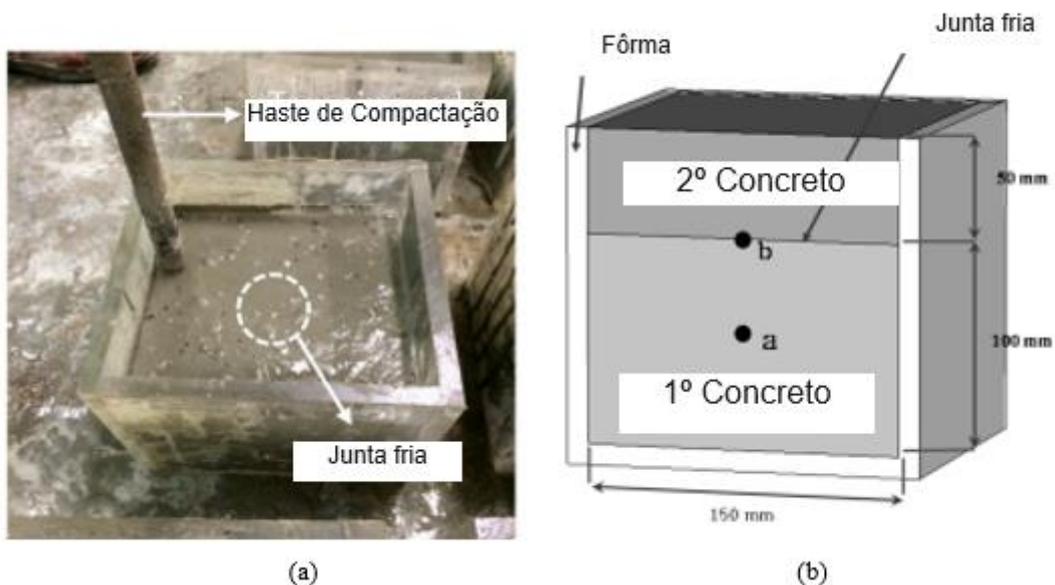
De acordo com Beushausen e Alexander (2008), a aderência pode se dar por mecanismos de interação mecânica, termodinâmica e química. É importante que se tenha a noção de que a aderência mecânica difere significativamente da resistência à tensão de cisalhamento. Por exemplo, alta rugosidade na interface pode melhorar a resistência ao cisalhamento, entretanto, a resistência de ligação dependerá principalmente da ancoragem transversal nos poros e vazios - é esse tipo de ancoragem que nos importa para este trabalho.

Tratando-se de elementos de concretos compostos por diferentes camadas, há de se destacar também a possível ocorrência de juntas frias nas superfícies de ligação. De acordo com Ferreira; Melo; Paula, (2021) a definição de junta fria se aplica na interrupção do lançamento do concreto, sendo ela planejada ou imprevista, interrupção que acarretará a um comportamento

mecânico prejudicado.

Lee et al. (2016) fazem utilização do ensaio realizado Momayez et al. (2004) e que serve de base para o ensaio deste trabalho; os autores explicam que se a concretagem entre um substrato e uma camada superior for interrompida temporariamente devido a algum imprevisto, pode ocorrer na seção de ligação entre essas camadas a presença de juntas frias (Figura 10), onde a continuidade entre o concreto da camada inferior e o concreto da camada superior não é garantida. Isto produz uma superfície de ligação imperfeita, que pode se tornar uma vulnerabilidade estrutural do material. Em particular, as juntas frias ocorrem arbitrariamente em locais inesperados, e levam a fissuras e vazamentos mediante a ocorrência de retração à medida que o concreto hidrata, bem como à corrosão das barras de reforço, o que pode levar à diminuição da durabilidade do elemento estrutural.

Figura 10 - (a) Concretagem da camada de substrato (b) Esquema do corpo de prova com duas camadas destacando a presença de junta fria.



Fonte: adaptado de Lee et al. (2016)

Helene e Figueiredo (2003) descrevem que a interface que se forma entre o concreto existente e o novo deve possuir resistência suficiente para desenvolver as propriedades mecânicas que constituem os fundamentos da análise estrutural. Existe uma série de recomendações para tratamentos de juntas de concretagem para se conseguir maior aderência e impermeabilidade entre concretos com idades diferentes.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

De acordo com o objetivo do estudo, que é avaliar o comportamento do concreto com gradação funcional (CGF) submetido ao esforço de cisalhamento puro, como exposto anteriormente. O CGF foi produzido em multicamadas utilizando dois tipos de concreto autoadensável: um convencional, denominado CAA; e o segundo leve (CCE), este obtido pela incorporação de aditivo espumígeno. Tanto o modelo do corpo de prova cúbico para verificação do cisalhamento puro quanto a metodologia de ensaio foram determinados de acordo com a literatura. No estado fresco, foram avaliadas a autoadensabilidade, a massa específica e o teor de ar nos concretos citados. Após a conclusão dos testes, foi iniciada a análise de compilação dos dados obtidos.

Cada concreto citado foi produzido individualmente para conhecimento de suas propriedades. A produção do CGF em camadas, visando a variação de densidade do material, tendo como foco o comportamento de elementos submetidos à flexão, isto é, a parte central do corpo de prova proposto será de menor densidade, tendo em vista a zona neutra de elementos submetidos a flexão, os corpos de prova foram moldados submetidos a ensaio de cisalhamento no sentido de verificar não só a resistência dos materiais individuais mas também dos elementos em camadas e da aderência entre as camadas

3.2 Metodologia

A metodologia do trabalho de conclusão de curso para a parte experimental foi dividida em quatro etapas, são elas:

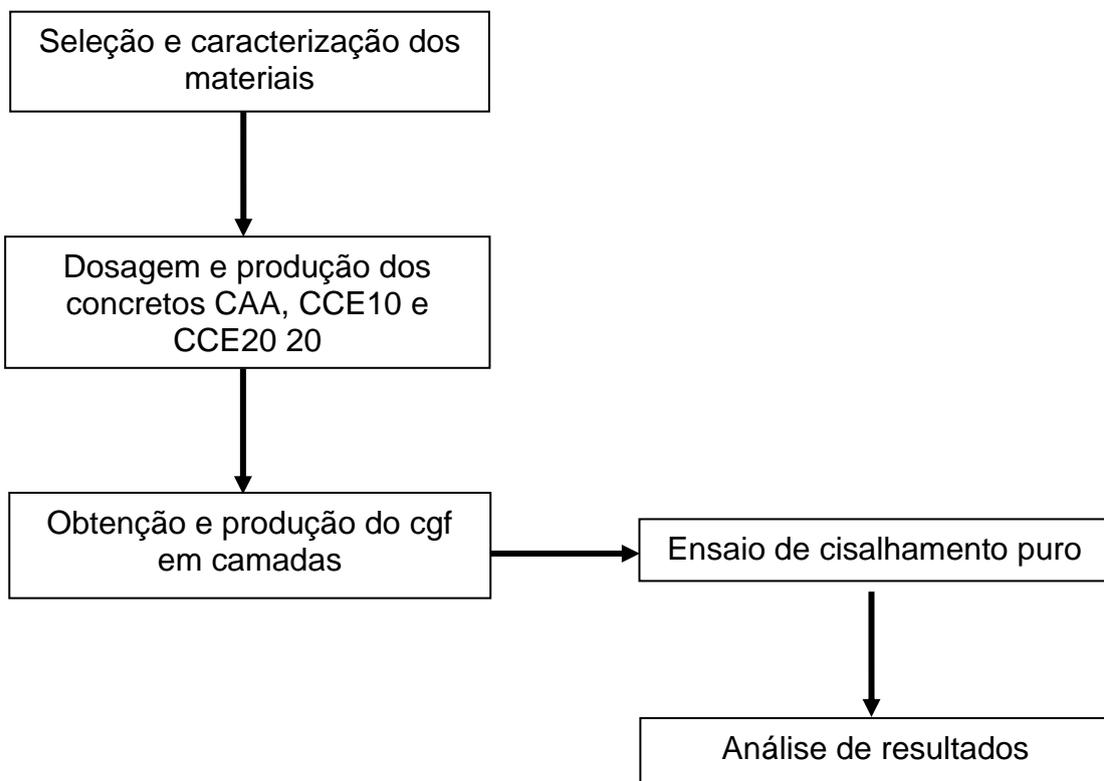
- Etapa 1: Abordou a seleção dos materiais, metodologia de dosagem, mistura e técnica de moldagem dos corpos de prova.
- Etapa 2: Nessa fase foram realizadas a produção e moldagem dos corpos de prova do concreto autoadensável (CAA) e do concreto celular espumoso (CCE), o CCE foi produzido com duas diferentes quantidades de teor de ar incorporado (10% e 20%). Para estes concretos foram obtidas as propriedades no estado fresco e endurecido;
- Etapa 3: Produção e moldagem dos corpos de prova dos concretos com gradação funcional. Primeiramente, foi realizado um estudo do tempo de concretagem entre a concretagem do CCE20 e do CAA para que se obtivesse o concreto de gradação em camadas. Depois, realizaram-se três composições de concretos com gradação funcional, para cada

composição foram produzidos seis corpos de prova, sendo três corpos de prova de primeira moldagem e três réplicas, estas réplicas foram realizadas para comparação dos resultados. Fazendo-se das graduações com até três camadas, são elas:

- I. Corpos de prova CCE1020 (2 camadas);
 - II. Corpos de prova CCE20CAA (2 camadas);
 - III. Corpos de prova CCE1020CAA (3 camadas);
- Etapa 4: Realização do ensaio de cisalhamento puro nos concretos com graduação funcional. Nesta etapa foi realizado o ensaio de cisalhamento puro proposto por Momayez, et al (2004) nos elementos de concreto com graduação funcional citados acima e depois realizou-se a avaliação dos resultados.

Um fluxograma da parte experimental é apresentado na figura a seguir:

Figura 11 - Fluxograma para metodologia de produção e obtenção do CGF.



Fonte: Autor (2022)

3.3 Seleção e caracterização dos materiais

Os seguintes materiais foram utilizados para a produção dos concretos:

- a) Cimento Portland, CPV ARI MAX, com resistência à compressão de 60 MPa, determinada conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019) e densidade de 2,99 g/cm³, determinada de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017);
- b) Resíduo do Beneficiamento de Mármore e Granito (RBMG) caracterizado pela NBR 10004/2004. O RBMG é um aditivo mineral inerte com alto teor de finos e ambientalmente sustentável;
- c) Aditivo incorporador de ar convencional/concentrado sintético para geração das espumas, com base química de sal de álcool graxo etoxilado sulfatado, com teor de sólidos de 5% e densidade de 1,0 g/cm³, de acordo com o fabricante;
- d) Aditivo superplastificante de 3ª geração, com base química de éter policarboxílico, com teor de sólidos médio de 30% e densidade de 1,087 g/cm³, de acordo com o fabricante;
- e) Aditivo modificador de viscosidade (AMV) e densidade aparente de 0,4g/cm³, de acordo com o fabricante;
- f) Agregados Miúdos Naturais (AMN) e Agregado Graúdos Naturais (AGN), caracterizados de acordo com as normas da ABNT.

3.4 Dosagem e produção dos concretos

A dosagem do CAA, assim como do CCE, foi obtida em estudos anteriores do grupo de pesquisa MECOEFIGON e do estudo de doutorado em andamento, respectivamente. Além da dosagem, os procedimentos de mistura (tempo e sequência de colocação dos materiais) para a produção de cada concreto de referência também foram definidos a partir dos estudos citados. A dosagem dos concretos está definida na tabela a seguir.

Tabela 1 - Composição dos concretos de referência

Volume de concreto (m ³)	Item	Unid.	CAA	CCE10	CCE20
1	Cimento	kg	409,3	673,41	598,41
	RBMG		204,7	-	-
	AMN		764,3	1009,71	897,2
	AGN		764,3	-	-
	Água		184,2	256,29	225,1
	Superplastificante		6,1	3,14	2,97
	AMV		-	4,52	9,04
	Espuma	%	-	10	20
	Fator Água/Cimento	-	0,45	0,38	0,38

Fonte: Autor (2023)

A produção dos concretos foi realizada no LEMA (Laboratório de Estruturas e Materiais) da Universidade Federal de Alagoas. A produção do CAA foi realizada numa betoneira de 400L (Figura 12) e seguiu-se de acordo com a produção convencional. A metodologia de produção respeitou a seguinte sequência:

1. Agregados miúdos e graúdos misturados por 30 segundos;
2. Adição e mistura da água de absorção por 1 minuto;
3. Adição e mistura do RBMG por 30 segundos;
4. Adição e mistura do cimento por 30 segundos;
5. Adição de 80% da água de mistura, mistura por 2 minutos;
6. Pausa para limpeza da betoneira por 1 minuto;
7. Adição de 20% da água de mistura e superplastificante, mistura por 2 minutos.
8. Caso a água de absorção não tenha sido colocada mas verifica-se a necessidade de utilizá-la, mistura por mais 1 minuto.

Figura 12 - Betoneira de 400L utilizada.



Fonte: Autor (2023)

Já a produção do concreto celular foi realizada numa argamassadeira de 50 L, que possui 2 velocidades, uma velocidade mais lenta denominada de velocidade 01 e uma outra mais rápida denominada de velocidade 02. O passo a passo para a produção se deu na seguinte sequência:

1. Umedecer a argamassadeira;
2. Adição e mistura de água e o cimento, deixando os materiais descansar por 30 segundos e em seguida misturar na velocidade 01 por 30 segundos;

3. Realizar a limpeza da argamassadeira por 30 segundos, em seguida deixar o material descansar por 30 segundos, após o descanso misturar na velocidade 02 por 1 minuto;
4. Adicionar o superplastificante durante 30 segundos e, em seguida, misturar na velocidade 01 por 30 segundos, logo após mudar para velocidade 02 e misturar por 1 minuto e 30 segundos;
5. Adicionar o aditivo modificador de viscosidade e misturar na velocidade 01 por 2 minutos;
6. Em paralelo à etapa 5 é iniciada a geração de espuma;
7. Adicionar areia e misturar na velocidade 01 por 2 minutos; adicionar a espuma (Figura13) e misturar na velocidade 01 por 2 minutos.

Figura 13 - Produção da espuma para posterior colocação nos concretos leve



Fonte: Autor (2023)

3.5 Ensaios dos concretos no estado fluido

Para verificação da autoadensabilidade do CAA foi realizado o ensaio de espalhamento - NBR 15823-2 (ABNT, 2007). O ensaio de massa específica foi realizado de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2008) em ambos os concretos (CAA e CCE).

3.6 Ensaios dos concretos no estado endurecido

No estado endurecido, foi realizado o ensaio de cisalhamento puro, conforme especificado no item 2.2.3. O ensaio foi realizado aos 28 dias nos corpos de prova

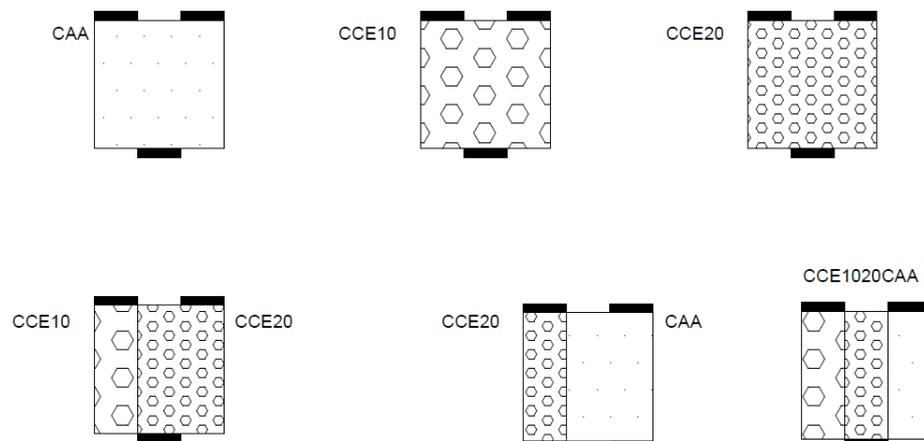
O rompimento dos CPs para obtenção dos resultados de cisalhamento puro foi realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA). O equipamento utilizado para este ensaio foi uma máquina de ensaios eletro-hidráulica, marca Amsler, com capacidade de aplicar forças de até 200 tf no frame de compressão.

Para os concretos individuais, a amostra foi completamente preenchida com uma camada (Figura 15). Com o ensaio de cisalhamento puro nesses concretos, foi possível determinar a tensão de cisalhamento. Esta tensão servirá de referência para comparação com resultados de tensão de cisalhamento obtidos nos CGF.

Outro fato que merece destaque é a posição em que o corpo de prova é submetido ao carregamento, o mesmo é realizado com as camadas na posição vertical de tal forma que as camadas ficaram paralelas ao sentido do carregamento, sendo para isso necessário rotacionar o corpo de prova em relação à posição que foi concretado para que o mesmo fique com a camada na posição adequada, visto que um dos objetivos deste ensaio é avaliar a seção de ligação entre as camadas quando submetida ao esforço de cisalhamento.

Por meio dessa abordagem é possível obter informações a respeito da resistência de cisalhamento entre as diferentes camadas, se a parte mais frágil estará na ligação entre dois concretos de diferentes ou dentro de um mesmo concreto. A quantidade de espécimes produzidos para cada tipo de concreto, conforme mencionado no item 3.2, está explicitado na Tabela 2.

Figura 14 - Configuração do teste de cisalhamento puro nos concretos individuais e de graduação



Fonte: Autor (2023)

Tabela 2 – Quantidade de corpos de prova de CGF produzidos para o ensaio de cisalhamento puro.

QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA DE CGF PARA O ENSAIO DE CISALHAMENTO PURO			
	CCE1020	CCE20CAA	CCE1020CAA
1ª MOLDAGEM	3	3	3
RÉPLICA	3	3	3

Fonte: Autor (2023)

Vale ressaltar que foi feita uma modificação quanto a forma original do ensaio. Nos corpos de prova estudados foram realizados cortes de 1,5 cm de profundidade nas regiões limite das placas de metal (Figura 16). Estes entalhes têm a intenção de induzir o cisalhamento puro, sem a presença de qualquer outro tipo de tensão.

Figura 15 - Corte de 1,5cm de profundidade na parte superior do corpo de prova.



Fonte: Autor (2023)

Figura 16 - Ensaio de cisalhamento puro em corpo de prova de CAA.



Fonte: Autor (2023)

4. RESULTADOS

4.1 Resultado dos ensaios no estado fresco

Primeiro, realizou-se a produção do concreto autoadensável e o teste de espalhamento, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 3, o concreto é classificado como SF2. Com os dados do ensaio da caixa L, que avalia a capacidade passante do CAA, foi obtido o resultado $\geq 0,8$, logo o CAA se enquadra na classificação PL2. O ensaio de escoamento apresentou tempo de 9,47 segundos se classificando como VS2.

Tabela 3 – Resultado do ensaio de espalhamento.

Espalhamento (mm)		
Medida 1	Medida 2	Medida 3
640	750	722
Média	704	
SF2		

Fonte: Autor (2023)

Tabela 4 – Resultado do ensaio de caixa L.

CAIXA L			
H1		H2	
60	60	15	15
50	50	6	6
10	10	9	9
10		9	
0,9			
PL2			

Fonte: Autor (2023)

Por fim, foi realizado para todos os concretos o ensaio que avalia a densidade dos concretos no estado fresco e apresentou como resultado 2361,00 kg/m³ para o CAA, 1710,00 kg/m³ para o CCE10 e 1452,00 kg/m³ para o CCE20.

4.2 Produção do CGF em camadas e modelagem do ensaio de cisalhamento puro

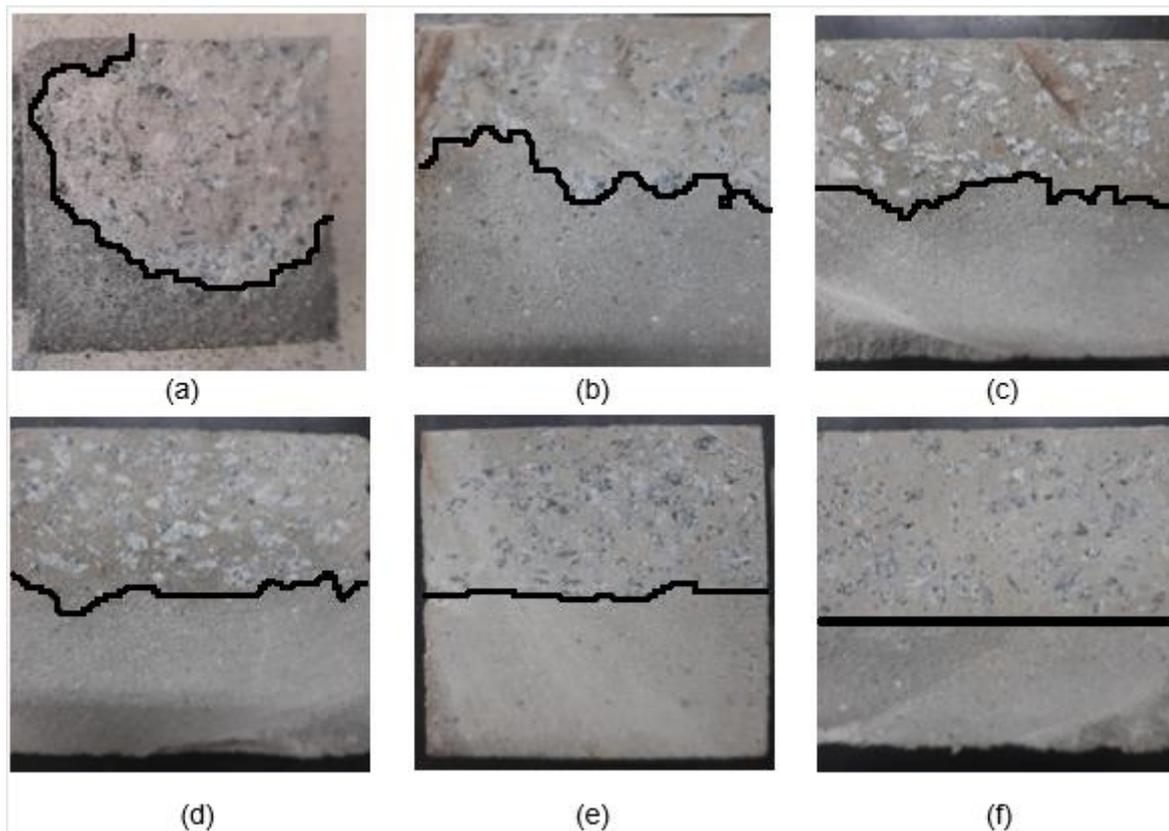
Antes de chegar nos resultados referentes ao ensaio de cisalhamento puro nos concretos de graduação, foram realizados alguns testes de modelagem para obtenção dos concretos em camadas.

Conforme já mencionado na metodologia, a configuração final de três camadas objetiva

chegar num elemento submetido à flexão, portanto a camada central do elemento, onde se encontra a zona neutra, será composta do concreto mais leve (CCE20), a camada superior destinada a resistir ao esforço de compressão será do concreto de maior densidade (CAA).

Portanto, considerando a configuração final desejada do concreto de três camadas (CCE1020CAA) e as diferença de densidade (ρ) entre os diferentes concretos, sabendo que $\rho_{CAA} > \rho_{CCE10} > \rho_{CCE20}$, foram realizadas concretagens de amostras de duas camadas, sendo a inferior de CCE20 e a superior de CAA, variando o tempo de concretagem entre essas amostras a fim de fazer uma análise e determinação do tempo necessário para se obter o CGF em camadas. As imagens das amostras com o respectivo tempo de concretagem entre as camadas estão descritos na Figura 17 a seguir.

Figura 17 - Concretagem de amostras CCE20CAA para verificação do tempo necessário para se obter o CGF em camadas. Concretagem das camadas no intervalo de tempo entre: (a) 20 min e 30 min; (b) 40 min e 50 min; (c) 50 min e 60 min; (d) 60 min e 70 min; (e) 70 min e 80min; (f) 80 min e 90 min.



Fonte: Autor (2023)

Foi constatado que para a concretagem da camada de CAA acima da camada de CCE20 num intervalo de tempo entre 20 minutos e 30 minutos, a camada de cima imergia na camada de baixo, como pode ser visto na Figura 17, impossibilitando a obtenção do concreto

de gradação em camadas. Ao fim desta etapa chegou-se na determinação do tempo entre a concretagem da camada de CCE20 e da camada de CAA num intervalo de tempo entre 1 hora e 20 minutos e 1 hora e 30 minutos para que se obtivesse o corpo de prova do concreto de gradação em camadas conforme proposto na metodologia.

Após o tempo de 1 hora e 30 minutos entre as concretagens, a colocação da camada superior de CAA na camada inferior de CCE20 foi realizada a cada 1 hora, e verificou-se que visualmente as camadas se mantinham horizontalmente - assim como para o tempo de concretagem final mostrado na Figura 17 - no entanto, as camadas perdiam aderência até o tempo de 5 horas entre as duas concretagens, quando se verificou a perda total da aderência entre as camadas.

4.3 Resultados do ensaio de cisalhamento puro

Na etapa de obtenção dos resultados do ensaio de cisalhamento puro, primeiramente, foi realizado o ensaio de cisalhamento nos concretos individuais CAA, CCE10 e CCE20 em corpos de prova, com dimensões de 15cmx15cmx15cm, conforme modelo descrito no item 3.6. Para cada tipo de concreto foi realizada uma primeira moldagem em três corpos de prova e, em seguida, uma segunda moldagem também com três corpos de prova, que chamamos de réplicas, as quais foram utilizadas para efeito de comparação.

Com os dados da força necessária para a ruptura dos CPs coletados a partir do ensaio na máquina de ensaio eletro-hidráulica, foi realizado o cálculo da tensão de cisalhamento da seguinte forma:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (MPa) \quad (1)$$

Sendo,

τ : Tensão de cisalhamento;

F : Força de ruptura fornecida pela máquina no ensaio de cisalhamento (em N);

$A = 150 \text{ mm} \times 135 \text{ mm} \times 2$: Área da seção transversal onde será incidido o carregamento, considerando o corte de 15 mm na parte superior das duas seções de ligação.

Os resultados estão descritos nas Tabelas 5 e 6. Com a média dos resultados da tensão de cisalhamento, foram realizados os gráficos comparativos entre a primeira moldagem e a réplica para cada tipo de concreto.

Foi possível verificar, a partir das análises dos resultados obtidos dos ensaios nos concretos individuais, que a tensão de cisalhamento das réplicas dos concretos individuais foi semelhante aos resultados dos ensaios nos concretos da 1ª moldagem, como explicitado na

tabela 5.

Tabela 5 - Tensão de cisalhamento em MPa na 1ª moldagem e réplica dos concretos individuais

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO CONCRETOS INDIVIDUAIS						
	CAA		CCE10		CCE20	
Amostra	1ª Moldagem	Réplica	1ª Moldagem	Réplica	1ª Moldagem	Réplica
1	9,25	9,15	6,37	6,51	4,87	4,89
2	9,31	9,25	6,42	6,49	4,99	4,96
3	9,67	9,54	6,56	6,54	4,92	4,92
MÉDIA	9,41	9,31	6,45	6,51	4,93	4,92
DESV. PADRÃO	0,23	0,20	0,10	0,03	0,06	0,04
CV (%)	2,44	2,15	1,55	0,46	1,22	0,81

Fonte: Autor (2023)

Assim como nos concretos individuais, a Tabela 6 a seguir mostra que para os concretos de graduação houve uma equivalência nos resultados da tensão de cisalhamento entre os concretos de 1ª moldagem e sua réplica, reforçado pelos valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 6 - Tensão de cisalhamento em MPa na 1ª moldagem e réplica dos concretos com graduação

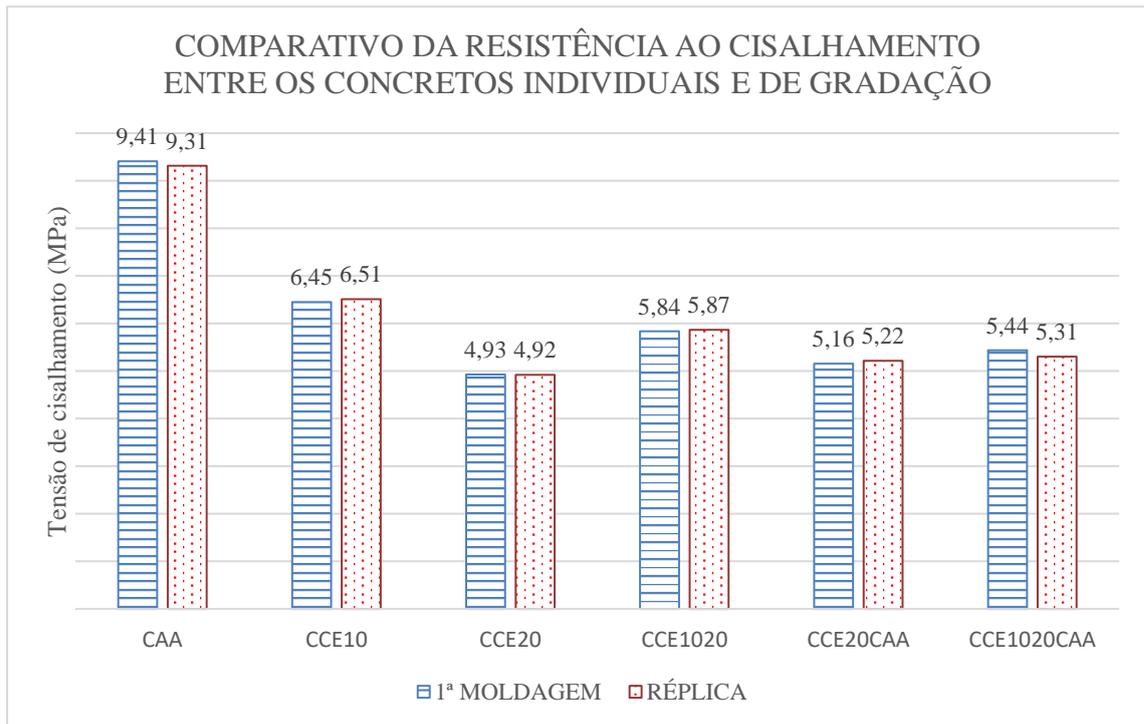
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO CONCRETOS COM GRADUAÇÃO						
	CCE1020		CCE20CAA		CCE1020CAA	
Amostra	1ª Moldagem	Réplica	1ª Moldagem	Réplica	1ª Moldagem	Réplica
1	5,84	5,86	5,18	5,21	5,53	5,27
2	5,81	5,88	5,13	5,23	5,41	5,32
3	5,86	5,86	5,16	5,21	5,37	5,33
MÉDIA	5,84	5,87	5,16	5,22	5,44	5,31
DESV. PADRÃO	0,03	0,01	0,03	0,01	0,08	0,03
CV (%)	0,51	0,17	0,58	0,19	1,47	0,56

Fonte: Autor (2023)

Examinando o gráfico na Figura 18, pode ser destacado a diminuição da resistência ao cisalhamento com a incorporação de ar no concreto. No CAA, sem ar incorporado, a resistência ao cisalhamento é maior que nos concretos leves, e o CCE20, concreto com maior

teor de ar incorporado, é o modelo com menor resistência ao cisalhamento. Estes resultados eram esperados, visto que o CAA é o concreto mais denso e que apresenta agregados em sua composição, portanto em seu interior há mais componentes que resistem de forma contrária ao esforço transversal ocasionado em decorrência do carregamento.

Figura 18 - Comparativo entre os concretos individuais e de gradação.



Isto posto, com a observância do gráfico na figura 18, pode ser averiguado também a interferência na resistência ao cisalhamento que a junção destes diferentes concretos causa. Se considerado o CAA, nos modelos de duas e três camadas, o CAA “perde” resistência, pois individualmente a média da resistência ao cisalhamento deste concreto foi de 9,41 MPa na 1ª moldagem, enquanto nas configurações de gradação CCE20CAA e CCE1020CAA, a média da resistência ao cisalhamento na primeira moldagem foi de respectivamente 5,16 MPa e 5,44 MPa.

De forma análoga, pode-se observar este comportamento para o CCE10, visto que, conforme explicitado na Tabela 5, individualmente este concreto apresentou uma média de resistência ao cisalhamento na 1ª moldagem de 6,45 MPa, enquanto na configuração de duas camadas e três camadas, a média da resistência ao cisalhamento na 1ª moldagem foi de, respectivamente, 5,84 MPa e 5,44 MPa.

Por outro lado, o CCE20 é beneficiado em relação à resistência ao cisalhamento

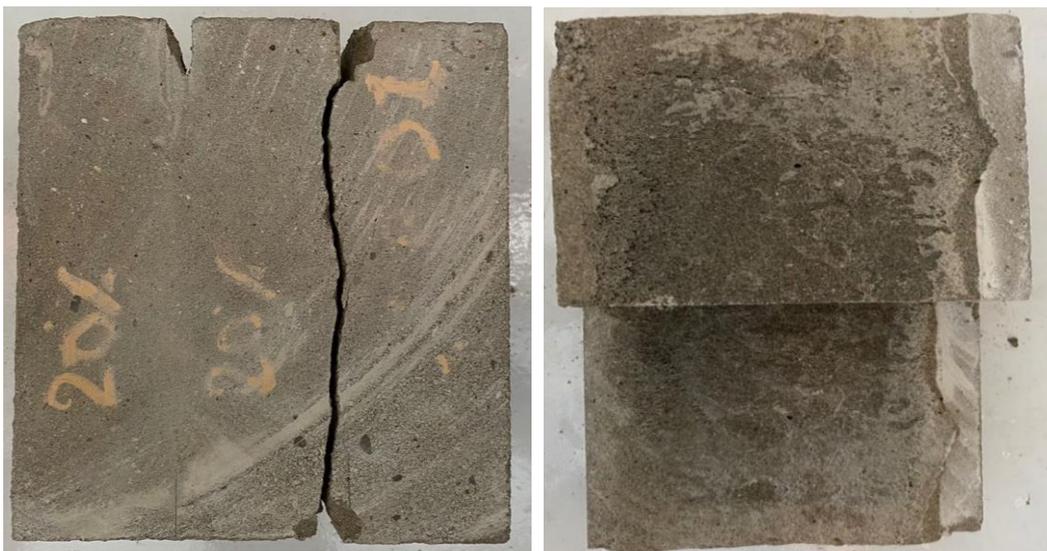
quando está presente no CGF, pois individualmente a média da resistência ao cisalhamento deste concreto na 1ª moldagem é de 4,93 MPa, enquanto na configuração CCE1020 e na configuração CCE20CAA, a média da resistência ao cisalhamento na 1ª moldagem é de, respectivamente, 5,84 MPa e 5,16 MPa.

Estes resultados estão em concordância com o que foi apresentado na revisão bibliográfica, onde foi visto na literatura que quando unido dois concretos de diferentes resistências à compressão, o concreto de menor resistência influencia negativamente na resistência final do CGF. Pode-se inferir, portanto, que ocorre o mesmo para a resistência ao cisalhamento, nesse caso ocasionado pela presença da ligação entre os concretos, que é o elo mais fraco do elemento estudado.

4.4 Análise visual da ruptura e da seção de ligação dos concretos

Analisando visualmente as condições de ruptura nos concretos de gradação, foi constatado que em todos os corpos de prova dos concretos de composição CCE1020 o rompimento se deu na ligação entre os dois tipos de concretos, como pode ser observado na Figura 19, contudo, houve a presença de fissuras fora da zona de rompimento como pode ser visto no concreto Réplica 02 (Figura 20).

Figura 19 – (a) Corpo de prova de referência 01 CCE1020 rompido. (b) Vista da seção de ligação entre o CCE10 e o CCE20 onde houve o rompimento.

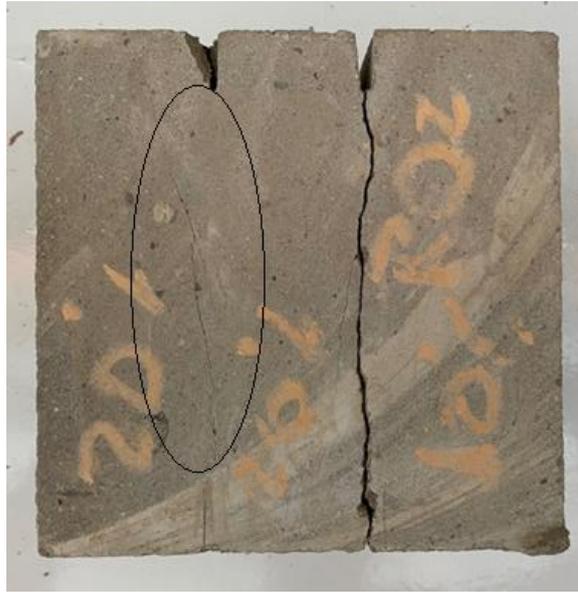


(a) Corpo de prova após o rompimento

(b) Seção de ligação entre o CCE10 e o CCE20

Fonte: Autor (2023)

Figura 20 - Corpo de prova réplica 02 CCE1020 rompido, com presença de fissura.



Fonte: Autor (2023)

Na primeira moldagem dos corpos de prova dos concretos de composição CCE20CAA, todos os espécimes romperam na seção de ligação entre os concretos (Figura 21). Nas réplicas dos concretos com essa mesma composição, nos três corpos de prova produzidos, houve fissura no CCE20, mas o rompimento, assim como na primeira moldagem, se deu na seção de ligação entre esses concretos.

Figura 21 - Corpo de prova de referência 01 CCE20CAA rompido.

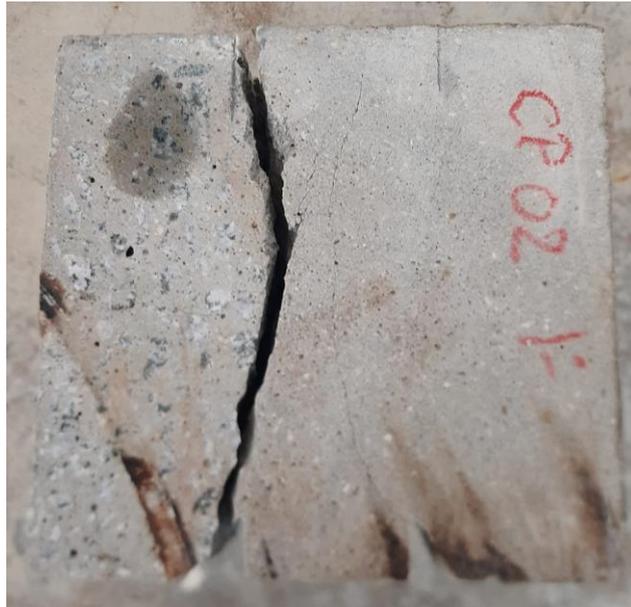


Fonte: Autor (2023)

Na análise visual dos corpos de prova CCE1020CAA, verificou-se que na 1ª

moldagem, os corpos de prova 01 e 02 romperam na ligação entre o CCE20 e o CAA (Figura 22), e o corpo de prova 03 apresentou a ruptura na seção de ligação entre o CCE10 e o CCE20. Já na segunda moldagem, todos os corpos de prova apresentaram a ruptura na ligação entre o CCE20 e o CAA, com algumas fissuras no CCE20 (Figura 23).

Figura 22 - Corpo de prova de referência 02 CCE1020CAA rompido.



Fonte: Autor (2023)

Figura 23 - Corpo de prova réplica 03 CCE1020CAA rompido.



Fonte: Autor (2023)

A seguir, o quadro 1 mostra o local da ruptura para cada corpo de prova ensaiado:

Quadro 1 - Local da ruptura nos corpos de prova

LOCAL DA RUPTURA NOS CORPOS DE PROVA DE GRADAÇÃO EM CAMADAS			
1ª MOLDAGEM			
	1	2	3
CCE1020	Seção de ligação entre concretos	Seção de ligação entre concretos	Seção de ligação entre concretos
CCE20CAA	Seção de ligação entre concretos	Seção de ligação entre concretos	Seção de ligação entre concretos
CCE1020CAA	Seção de ligação entre os concretos CCE20 e CAA	Seção de ligação entre os concretos CCE20 e CAA	Seção de ligação entre o CCE10 e o CCE20
RÉPLICA			
	1	2	3
CCE1020	Seção de ligação entre concretos	Seção de ligação entre concretos	Seção de ligação entre concretos
CCE20CAA	Seção de ligação entre concretos	Seção de ligação entre concretos	Seção de ligação entre concretos
CCE1020CAA	Seção de ligação entre os concretos CCE20 e CAA	Seção de ligação entre os concretos CCE20 e CAA	Seção de ligação entre os concretos CCE20 e CAA

Fonte: Autor (2023)

Com a verificação do local de ruptura nos corpos de prova, podemos concluir que o elo mais fraco nos concretos de duas camadas está na seção de ligação, visto que a ruptura dos CPs ocorreu sempre na junção entre os concretos. Já na configuração de três camadas, o local mais frágil do elemento está localizado na seção de ligação entre o CCE20 e o CAA, onde ocorreu a maioria da ruptura desses espécimes. Isto se deve pela perda de aderência entre as camadas ocasionado pelo tempo entre a concretagem de CCE20 e do CAA, como foi explicado no item 4.2. Além desse fato, a maior resistência ao cisalhamento da seção de ligação entre as camadas de CCE10 e CCE20 se dá pela maior adesão entre os poros e vazios que se encontram em maior quantidade nessa ligação.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou três tipos de concretos de gradação, mostrando um teste específico de cisalhamento puro para avaliação do comportamento mecânico do corpo de prova e da seção de ligação entre as camadas de concreto.

Para obtenção do modelo em camadas foi verificado que o tempo entre a concretagem das camadas influencia significativamente na obtenção do concreto de gradação, logo, é preciso ser metucioso na escolha do tempo entre uma concretagem e outra, pois para uma concretagem muito rápida entre as camadas, pode ocorrer a imersão da camada de concreto superior na inferior, como foi constatado que, para um tempo entre 20 min e 30min a camada de CAA imergia na camada de CCE20; por outro lado, para um tempo de concretagem longo, há a possibilidade da seção de ligação entre as camadas apresentar uma junta fria que possivelmente interviria negativamente na aderência entre essas camadas. Por fim chegou-se no intervalo entre 1h20min e 1h30min como tempo necessário para se obter o concreto de gradação em camadas.

Para realização do ensaio de cisalhamento puro, realizou-se a rotação do corpo de prova em relação a sua posição de moldagem, assim, as seções de ligação entre os concretos também seriam solicitadas, além de efetuar cortes nos limites das placas de metal posicionadas no corpo de prova para o ensaio, a fim de induzir o cisalhamento puro.

A partir dos resultados do ensaio de cisalhamento puro, foi constatado que a presença de vazios no interior do concreto afeta negativamente na resistência ao cisalhamento do concreto, isso pode ser assegurado pelos valores da tensão de cisalhamento que diminui à medida que é acrescida espuma no concreto, conforme mostrado nos resultados da resistência ao cisalhamento para os concretos individuais na tabela 5.

Ainda, é possível inferir que após a junção entre as camadas de diferentes concretos, a camada do concreto de menor resistência (CCE20) interfere negativamente na resistência final dos modelos de duas e três camadas.

Por fim, as avaliações visuais das rupturas ocasionadas pelo teste de cisalhamento puro mostram que, na configuração de três camadas, a ruptura se deu em sua maioria na seção de ligação entre as camadas de CCE20 e CAA, e comparando os resultados entre os concretos de duas camadas (CCE1020 e CCE20CAA), foi verificado que a média da resistência do CCE1020 é maior que no CCE20CAA, portanto podemos concluir que na seção de ligação entre as camadas de CCE10 e CCE20 houve uma aderência maior entre esses concretos, causada pela adesão entre os poros e vazios, que nesses concretos se encontram em maior quantidade.

A diminuição na resistência da aderência entre o CCE20 e CAA pode se dar pela diferença de tempo entre uma concretagem e outra, como já foi visto anteriormente o intervalo de tempo é de 1h20min e 1h30min.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, D. L. **Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em elementos submetidos à flexão**. 1997. 299 p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931**-Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR NM 49**: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas, Rio de Janeiro, 2001.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR NM 248**: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6118**: Projetos de Estrutura de Concretos - Procedimentos. São Paulo, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **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 - **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 - **NBR 10004**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 12142**: Concreto – Determinação de resistência à tração na flexão de corpo de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

AUAD, SAMIR PARENTE; PRACIANO, JAMIRES SOUSA CORDEIRO; PARENTE JÚNIOR, EVANDRO; SOUSA JÚNIOR, JOÃO BATISTAS MARQUES DE. **Análise da estabilidade de placas de materiais com gradação funcional usando uma abordagem isogeométrica**. In: SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL - SIMMEC, XIII., 29 out. a 01 nov. 2018, Vitória-ES. Anais[...], Vitória - ES, 2018.

AYLIE, H. *et al.* **Parametric study of the load carrying capacity of functionally graded concrete of flexural members**. International Journal of Engineering and Technology Innovation, 2015. v. 5, n. 4, p. 233–241.

BALAY, J. M., ELICES, M., & PLANAS, J. **Fundamentos de hormigón armado y pretensado**. Pearson Educación, 2018.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR, E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos Materiais**. Tradução José Beneque Rubert, Walter Libardi, 2011. 5ª Edição. New York: The McGraw-Hill Companies, 2008

BEUSHAUSEN, H., ALEXANDER, M. G. **Bond strength development between concretes of different ages**. Magazine of Concrete Research, v. 60, n. 1, 2008, p. 65- 74.

BORDIGNON, RODRIGO. **RESISTÊNCIAS DOS MATERIAIS 03 - CISALHAMENTO. 2022**. PDF. Disponível em:

<https://moodle.passofundo.ifsul.edu.br/pluginfile.php/102203/mod_resource/content/1/RM-03-Cisalhamento.pdf>. Acesso em: 03/10/2022.

CARNEIRO, MARCELO BERTOLETE; CRUZ, ISRAEL APARECIDO; FREDERICCI, CÁTIA; MACHADO, IZABEL FERNANDA. **Sinterabilidade de materiais de ferramenta de corte em gradação funcional com três camadas**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 7., 2012, São Luís. Anais... Rio de Janeiro: ABCM, 2012. 8 p.

CUSSON, D., CHAALLAL, O., & TREMBLAY, R. (2012). **Shear behavior of high-performance fiber-reinforced cementitious composites**. ACI Structural Journal, 109(6), 737-748.

DAVIS, G. H., & REYNOLDS, S. J. **Structural Geology of Rocks and Regions (2nd ed.)**. New York: John Wiley & Sons, Inc. (1996).

DORIA, M. R.; SALES, A. T. C; ANDRADE, N. F. de A. **Aderência aço-concreto e entre concretos de diferentes idades em recuperação de estruturas**. Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo , v. 8, n. 5, p. 604-624, Oct. 2015.

DIVAKAR, M.P.; FAFITIS, A. (1992). **Micromechanics-based constitutive model for interface shear**. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, v.118, n.7, p.1317- 1337, July.

EL-TAWIL, SHERIF, et al. **State-of-the-art report on fiber-reinforced concrete**: ACI 544.4R-88. American Concrete Institute, 2003.

ELWI, A. E., & EL-GAMAL, S. M. **Cyclic response of reinforced concrete members with different shear span-to-depth ratios**. ACI Structural Journal, 103(1), 51-59 (2006).

FROSCH, R. J. **Shear tests on concrete beams**. ACI Journal Proceedings, 74(7), 315-323 (1977).

FERREIRA, WILLER MOTA; MELO, PEDRO TOMÉ DE; PAULA, MARCELO CÂNDIDO DE. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO APLICADO EM CAMADAS**. GLOBAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2021. 1984-3801.

Fundamentos de concreto armado. Notas de aula, Curso de Graduação em Engenharia Civil – UNESP.

FUSCO, PÉRICLES BRASILIENSE, 1930- **Técnica de armar as estruturas de concreto/** Péricles Brasiliense Fusco – São Paulo: 1995.

GAN, B. S.; AYLIE, H.; PRATAMA, M. M. A. **The behavior of graded concrete, an experimental study.** Procedia Engineering, 2015. v. 125, p. 885–891. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.076>>.

COSTA, H. D. O. **MANUAL DE USO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE LAJES PLANAS PROTENDIDAS.** Monografia (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil.) - Instituto Federal de Sergipe, 2021.

PINHEIRO, L.M. **Fundamentos do concreto e projetos de edifícios.** Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2004.

HAN, A.; GAN, B. S.; PRATAMA, M. M. A. **EFFECTS OF GRADED CONCRETE ON COMPRESSIVE STRENGTHS.** International Journal of Technology, 2016. v. 5, p. 732–740.

HIBBELER, RUSSELL CHARLES. **Resistência dos materiais /** Russell Charles Hibbeler; tradução Arlete Simille Marques; revisão técnica Sebastião Simões da Cunha Jr.- 7. ed. - São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LEE H-S, JANG H-O, CHO K-H. **Evaluation of Bonding Shear Performance of Ultra-High-Performance Concrete with Increase in Delay in Formation of Cold Joints.** Materials. 2016; 9(5):362.

LI, M., LI, C. V. **High-Early-Strength Engineered Cementitious Composites for Fast, Durable Concrete Repair: its fol just online journalism.** ACI Material Journal. Miami, Mai, 2011.

LIU, X., YAN, M., GALO BARDES, I., SIKORA, K. **Assessing the potential of functionally graded concrete using fibre reinforced and recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials,** 2018, vol 171, pg. 793- 801.

MELO, C. V. A.; MONTEIRO, R. D.; GOMES, P. C. G. **Estudo do volume de pasta em**

diferentes composições de agregados para concreto autoadensável. HAC/2018 V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018. Editora Universitat Politècnica de València.

MOHAMAD, M. E. et al. **Friction and cohesion coefficients of composite concrete-to-concrete bond.** *Cement and Concrete Composites*, v. 56, p. 1–14, 2015. HANAI, J. B. De. Fundamentos do Concreto Protendido. Universidade de São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Estruturas.

MOMAYEZ, A.; RAMEZANIANPOR, A. A.; RAJAIE, H.; EHSANI, M. R. **Bi-surface shear test for evaluating bond between existing and new concrete.** *ACI Materials Journal*, 2004

MUTTONI, A., & SCHWARTZ, A. (2012). **Shear strength of structural concrete: experimental study and modeling.** *ACI Structural Journal*, 109(6), 789-799.

MUTTONI, A., & SCHWARTZ, H. P. **Structural concrete: Theory and design.** EPFL Press (2012).

NEVILLE, A. M., & BROOKS, J. J. *Concrete technology.* Pearson Education (2010). PINHEIRO, L.M. **Fundamentos do concreto e projetos de edifícios.** Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2004.

SILVA, A. DOS S. DA; DIAS, C. M. R.; RIBEIRO, D. V. **CONCRETOS COM GRADAÇÃO DE POROSIDADE,** 2016.

SOUZA, V. C. M; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto,** 5ª Ed. São Paulo: PINI, 2005.

STIEDER, E.; HILBER, R.; STIERSCHNEIDER, E.; BERGMEISTER, K. **FE-Study on the effect of gradient concrete on early constraint and crack risk,** 2018; APPLIED SCIENCES.

TIMOSHENKO, STEPHEN P. **Mecânica dos sólidos: Volume I** / Stephen P. Timoshenko [et] James E. Gere; tradução e coordenação técnica de José Rodrigues de Carvalho. – Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1983.

TORELLI, G.; FERNÁNDEZ, M. G.; LEES, J. M. **Functionally graded concrete: Design objectives, production techniques and analysis methods for layered and continuously graded elements.** *Construction and Building Materials*, v. 242, p. 118-140, 2020.

WHITE, FRANK M. **Mecânica dos fl uídos [recurso eletrônico]** / Frank M. White ;
tradução: Mario Moro Fecchio, Nelson Manzanares Filho ; revisão técnica: José Carlos Cesar
Amorim. – 6. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : AMGH, 2012