



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica

LEANDRO BERTACO LÚCIO

**ANÁLISE COMPORTAMENTAL SOB ESFORÇOS DE FLEXÃO DE
VIGAS EM CONCRETO ARMADO COM ARMADURAS SOLDADAS E
AMARRADAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2022

LEANDRO BERTACO LÚCIO

**ANÁLISE COMPORTAMENTAL SOB ESFORÇOS DE FLEXÃO DE VIGAS EM
CONCRETO ARMADO COM ARMADURAS SOLDADAS E AMARRADAS**

**Behavioral analysis under bending efforts of beams in reinforced concrete with
welded and tied armor**

Trabalho de conclusão de curso de Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Dr. João Roberto Sartori Moreno.

CORNÉLIO PROCÓPIO
2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio



LEANDRO BERTACO LÚCIO

**ANÁLISE COMPORTAMENTAL SOB ESFORÇOS DE FLEXÃO DE VIGAS EM
CONCRETO ARMADO COM ARMADURAS SOLDADAS E AMARRADAS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Ciências Mecânicas.

Data de aprovação: 27 de Maio de 2022

Dr. Joao Roberto Sartori Moreno, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Dra. Janaina Fracaro De Souza Goncalves, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Dra. Larissa Galante Dias, Doutorado - Faculdade Estácio de Sá de Ourinhos (Faeso)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 27/05/2022.

Dedico esse trabalho a minha família, por toda a estrutura e apoio durante seu desenvolvimento, em especial a minha esposa e mãe que sempre me encorajou nos momentos difíceis; a minha filha, que é a razão de sempre me tornar algo melhor.

Dedico também a todos os colegas de profissão, que sempre busquem melhorar os seus trabalhos, baseados em estudo científicos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à instituição por ter me dado oportunidade de pesquisar e estudar engenharia mecânica.

Agradeço especialmente o PhD João Roberto Sartori Moreno pela sua orientação neste trabalho e amizade durante essa jornada.

Agradeço também a todas as amigades que fiz durante o curso.

Agradeço a unidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná de Curitiba UTFPR - DACOC - Departamento Acadêmico de Construção Civil, em especial, ao Felipe Perretto, que mesmo no momento delicado de pandemia da SARS-CoV-2, se prontificou em ajudar na disponibilidade do laboratório e na execução dos ensaios.

Agradeço a FAESO (Faculdade Estácio de Sá de Ourinhos), pelo apoio com o uso dos laboratórios e no incentivo aos trabalhos científicos.

"Do your best, in the condition you have, while you have no better conditions, to do even better!" (Cortella, Mário Sergio)

"Faça o teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda!" (Cortella, Mário Sergio)

Lúcio, Leandro Bertaco. ANÁLISE COMPORTAMENTAL SOB ESFORÇOS DE FLEXÃO DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO COM ARMADURAS SOLDADAS E AMARRADAS. 2022. 96p. Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2022.

RESUMO

Com o objetivo desenvolver uma alternativa ágil e de qualidade para a execução de elementos de viga de concreto armado com a utilização de armações amarradas com arame recozido e soldas por eletrodo revestidos, que funcionam como ligação de vergalhões (CA50 - aço de construção) e que são submetidos a ensaios de flexão simples. O processo executivo da armação quando soldada é muito mais eficiente e segura, gerando segurança aos operários e economia de 60% em mão-de-obra nos serviços de armações e um aumento da produtividade em 146%. Pode-se constatar que os elementos de viga soldados apresentam um desempenho satisfatório se submetidos a flexão simples. As vigas de controle (grupo 1 - amarradas) apresentaram resistência em média de 45 kN quando atingem o estágio III. Já as vigas com armação soldada (grupo 2), apresentaram resistências de 44 kN atingindo o estágio III. Mesmos que ligeiramente inferior, apresenta desempenho satisfatório. Os elementos permaneceram deformando até o limite de 35 mm, sem perder a capacidade de resistir a carga. os processos executivos para soldagem dos elementos da armação são mais relevantes para esse processo. Assim as características de velocidade, rigidez e segurança, são obtidos a partir da soldagem de armações de aço CA-50.

Palavras-chave: Aço CA-50; Arame Recozido; Eletrodo Revestido; Armadura de vigas; Armações Soldadas.

Lúcio, Leandro Bertaco. ANÁLISE COMPORTAMENTAL SOB ESFORÇOS DE FLEXÃO DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO COM ARMADURAS SOLDADAS E AMARRADAS. 2022. 96p. Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2022.

ABSTRACT

With the objective of developing an agile and quality alternative for the execution of concrete life elements with the use of frames tied with annealed wire and welds by coatings, which work like rebar (CA50 - reinforced construction steel) and which include the simple bending tests. The executive frame process when sold is much more efficient and safer, generating safety for workers and 60% savings in labor in frame services and an increase in profitability by 146%. It can be seen that the beam elements presented presented a performance of performance of simple results. The control beams (group 1 - tied) had an average strength of 45 kN when they reached stage III. As for beams with welded reinforcement (group 2), they showed strengths of 44 kN, reaching stage III. Even if inferior, it presents satisfactory performance. The elements remain deforming up to a limit of 35 mm, without losing their ability to withstand load. the executive processes for the frame elements are most relevant to this process. As well as the characteristics of durability, strength and safety, the installation of CA-50 steel frames is obtained.

Keywords: CA-50 steel; Annealed Wire; Coated electrode; Beam Armor; Welded Frames.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Definições de concreto.....	22
Figura 2 - Viga de concreto sem armadura.	24
Figura 3 - Viga de concreto com armadura (armado).....	24
Figura 4 – Exemplificação da Curva de Tensão x Deformação.....	26
Figura 5 - Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro.	29
Figura 6 - Microestruturas de um vergalhão submetido ao themex.....	29
Figura 7 - Seção retangular submetida à flexão simples-armadura simples	31
Figura 8 - Exemplos de tipos de solda	34
Figura 9 - Processo de soldagem por eletrodo revestido	36
Figura 10 - Esquematização de eletrodo revestido	36
Figura 11 - Nomenclatura das diferentes regiões da ZTA de um passe único, e da ZTA reauecida numa soldagem multipasses.....	39
Figura 12 - Microestrutura da ZAC junto ao pé do último cordão de solda em CA-50, comporta de grãos grosseiros contendo ferreta e perita.	40
Figura 13 - Barra nervurada de aço CA-50 soldada.....	42
Figura 14 - Estádio I em flexão pura.	44
Figura 15 - Estádio II em flexão pura.	45
Figura 16 - Estádio III em flexão pura.	45
Figura 17 - Ensaio à flexão de viga de concreto armado.	46
Figura 18 - Analogia de Morsh.	47
Figura 19 -Linhas de esforços em uma viga biapoiada.....	47
Figura 20 - Esquema do ensaio.	49
Figura 21 - Apresentação do sistema real de aplicação de força.....	50
Figura 22 - Modelo plano do ensaio.	51
Figura 23 - Diagrama de momentos fletores e reações de apoio.....	51
Figura 24 - Representação gráfica dos elementos geométricos da seção transversal da viga.....	52
Figura 25 - Domínios de estado-limite último de uma seção transversal para a viga em estudo.....	53
Figura 26 - Diagrama de esforços cortantes.	54
Figura 27 - Detalhamento da seção longitudinal da viga.....	55
Figura 28 - Detalhamento da seção transversal da Viga.....	56

Figura 29– Apresentação da armadura montada das vigas.....	56
Figura 30 - Apresentação da dobra do estribo utilizado no estudo.	57
Figura 31 - Método de amarra por arame recozido.	58
Figura 32 - Apresentação de armadura amarrada em um corpo de prova.....	58
Figura 33 - Apresentação da ligação por solda em uma armação do corpo de prova.	59
Figura 34 - Formas de madeirite naval dos corpos de prova.	62
Figura 35 - Armação posicionada nas formas.	62
Figura 36 - Adensamento do concreto dos corpos de prova.....	63
Figura 37 - Apresentação dos corpos de prova moldados.	63
Figura 38 - Máquina de Ensaio com copo de prova posicionado.....	64
Figura 39 - Desalinhamento das ligações soldadas.	67
Figura 40 - Diagrama de força x deformação de vigas de concreto submetidas a flexão simples.....	70
Figura 41 - Diagrama de força x deformação de vigas de concreto submetidas a flexão simples com armadura amarrada.	71
Figura 42 - Diagrama de força x deformação de vigas de concreto submetidas a flexão simples com armadura soldadas.	71
Figura 43 - Viga com surgimento de esmagamento do concreto - Estádio III.	72
Figura 44 - Diagrama de força x deformação de vigas de concreto submetidas a flexão simples – sem comportamento atípico.....	73
Figura 45 - Vigas Submetidas a Flexão Simples –Com Alteração Expressiva.....	74
Figura 46 - Ensaio da Viga V1A.	75
Figura 47 - Inspeção da viga amarrada (V1A).....	76
Figura 48 - Ruptura do corpo de prova 5 (V5S).	77
Figura 49 - Esquema da ruptura por cisalhamento.	78
Figura 50 - Verificação dos estribos da Viga V5S.	79
Figura 51 - Deslocamento da armadura longitudinal (V5S).....	79
Figura 52 - Possíveis pontos fragilizados pela soldagem.....	80
Figura 53 - Detalhe no ponto de solda.	81
Figura 54 – Avaliação dos Quesitos Executivos.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das barras.	26
Tabela 2 - Elementos da Liga do CA50S.	27
Tabela 3 - Composição Química CA-50.....	27
Tabela 4 - Especificações das vigas do programa experimental.....	50
Tabela 5 - Quantidade, tipos e cortes de Aço por viga.....	57
Tabela 6 - Volume de Concreto necessário.	60
Tabela 7 - Quantitativos dos materiais da dosagem.	60
Tabela 8 - Tempo dos processos.	67
Tabela 9 - Comparação de custo e produtividade.....	68
Tabela 10 - Quesitos avaliativos da execução.	68

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	– Associação Brasileira de Cimento Portland;
ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ANSI	– American National Standards Institute;
ASTM	– American Society for Testing and Materials;
CA	– Concreto Armado;
CA50	– Classe de Concreto Armado – 500 MPa;
CP	– Cimento Portland;
IBRACON	– Instituto Brasileiro de Concreto;
NBR	– Norma Técnica;
ZTA	– Zona Termicamente Afetada;

SUMÁRIO

1	Introdução	10
2	Objetivos	13
3	Revisão Bibliográfica.....	14
3.1	Materiais de Construção Civil	14
3.1.1	Cimentos e seus tipos	14
3.1.2	Agregados utilizados	16
3.1.3	Concreto Simples	21
3.1.4	Concreto Armado	22
3.1.5	Características do aço de construção	25
3.2	Engenharia de Estruturas	29
3.2.1	Vigas	30
3.2.2	Armaduras de elementos de CA.....	31
3.2.3	Principais patologias das amarrações	33
3.3	Soldas.....	33
3.3.1	Tipos e Características da Soldas.....	34
3.3.2	Solda de Eletrodo Revestido	35
3.3.3	Processos de Soldagens.....	35
3.3.4	Zona Termicamente Afetada (ZTA).....	39
3.4	Armaduras Soldadas para Elementos de Concreto	40
3.5	Projeto de Estruturas de Concreto Segundo a NBR 6118.....	42
3.5.1	Segurança nas Estruturas	43
3.5.2	Elementos lineares submetidos a flexão simples (pura).....	43
3.5.3	Estádios típicos da flexão pura.....	44
3.5.4	Componentes da Armação de Vigas de Concreto.....	46
4	Materiais e Métodos.....	49
4.1	Programa experimental.....	49
4.1.1	Detalhamento e Dimensionamento das Vias.....	51
4.1.2	Execução das amarrações	57
4.1.3	Execução das Soldas	59
4.1.4	Traço de Concreto.....	60
4.1.5	Execução dos Corpos de Prova	61
4.1.6	Ensaio de Flexão Simples	64
5	Resultados e Discussão.....	66
5.1	Resultados Obtidos.....	66
5.2	Discussões dos Resultados.....	81
6	Conclusões	85
7	Referências.....	87

1 INTRODUÇÃO

Os materiais atualmente, simples ou compostos, podem ser obtidos diretamente da natureza ou elaborados industrialmente. Sua evolução é tão rápida que o profissional, para não ficar desatualizado, deve permanecer sempre atento aos novos conhecimentos e invenções, estando em constante estudo durante sua vida profissional. Estar atualizado no estudo de materiais inclui hoje, mais do que nunca, saber também como produzi-los, aplicá-los e descartá-los ao final dos processos ou da vida útil, de maneira sustentável (Bauer, 2019).

Projetistas de máquinas, veículos e estruturas devem alcançar níveis aceitáveis de desempenho e economicidade, ao mesmo tempo que se esforçam para garantir que o produto projetado seja seguro e durável (Dowling, 2018).

A constante mudança de padrões no setor da construção civil exige das empresas um posicionamento competitivo, baseado na realidade do mercado, nas necessidades dos clientes, na atuação da concorrência e nos meios de produção (Alves, Mattioda, & Cardoso, 2009).

Nos dias atuais muitas edificações são construídas utilizando o concreto, que é um material combinado de cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (pedra ou brita). O concreto pode também conter aditivos químicos, com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades básicas. Esse material é alcançado pela dosagem adequada de cada componentes, que irá definir as duas propriedades no estado fresco quanto no estado endurecido, onde algumas necessidades do projeto podem solicitar desempenhos diferentes em cada um deles (Bastos, 2019).

Os vergalhões de maneira geral são utilizados juntamente ao concreto, pois eles são um material que apresenta elevada resistência à compressão. Porém, possui baixa resistência à tração, cerca de 10% de sua resistência à compressão. Logo é essencial a utilização de vergalhões associados ao concreto, compensando a baixa resistência à tração do concreto a partir da resistência à tração do vergalhão. Assim, surgiu o conceito de concreto armado (CA), ou seja, a utilização dos aços longos na forma de armaduras metálicas que absorvem as tensões de tração, enquanto o concreto absorve as tensões de compressão que são impostas na estrutura (Demarque, et al., 2015).

Como o vergalhão faz parte da composição dos elementos estruturais do concreto armado, eles são comumente usados em pilares, lajes e vigas, que são componentes básicos de edificações em geral, independentemente de ser comercial ou residencial (Barreto, 2014).

A armadura, também chamada de ferragem, é definida como “a associação de diversas peças de aço, formando um conjunto para um determinado componente estrutural”. Dependendo do tipo de fornecimento de aço, a associação dessas peças pode se dar por meio de arame recozido ou soldagem. Destacam que a função principal das armaduras é absorver as tensões de tração e ajudar a aumentar a capacidade resistente das peças ou componentes que estão resistindo à compressão (Salim Neto, 2009).

A soldagem é o processo de juntar peças metálicas, colocando-as em contato, e aquecer as superfícies de contato de modo a levá-las a um estado de fusão ou de plasticidade. A expressão solda é usada para designar o resultado da operação. A ação de aproximação e aquecimento, plasticidade ou fusão parcial, leva a um fenômeno de difusão na zona soldada, dando como resultado, a junta (solda), que se caracteriza por sua resistência e que se torna perfeitamente coesa depois que o metal esfria. A soldagem encontra aplicação extensa em quase todos os ramos da indústria e da construção mecânica e naval, além da engenharia civil. Os processos de soldagem podem ser classificados de acordo com a fonte de energia empregada para aquecer os metais e a condição do metal nas superfícies em contato (Chiaverini, 1986).

Os elementos de liga adicionados ao aço estrutural (CA) devem ser severamente controlados com a finalidade de possibilitar o monitoramento da microestrutura resultante do processo de soldagem, com o objetivo de evitar a formação de fases frágeis no resfriamento da junta soldada. A adição dos elementos de liga aumenta a temperabilidade do aço favorecendo a transformação martensítica no resfriamento, fato indesejado numa junta soldada, pois a martensita é uma fase fragilizante (Demarque, et al., 2015).

Com a crescente industrialização da construção, houve a necessidade de desenvolver novas tecnologias para melhorar a eficiência do processo construtivo, de qualquer natureza. As construções convencionais de concreto armado utilizam,

em grande parte dos processos, amarrações por arame recozido, processo que é delicado e muito trabalhoso.

A função da amarração das armaduras é deixar os componentes na posição necessária ao projeto e, com a utilização da solda, este processo pode ser mais eficiente e eficaz. Essa metodologia é utilizada atualmente somente em alguns casos de emendas de vergalhões (união por transpasse) e alguma “telas” soldadas industrialmente, mas não na ligação de estribos (armadura de travamento das barras longitudinais e de resistência a esforços cortantes) e/ou outros componentes de uma armadura. Assim, busca-se utilizar a solda para tornar o processo mais rápido e seguro em relação as outras metodologias, evitando problemas como a movimentação desses componentes da armação pelo transporte dessa armadura.

Vale ressaltar que nas características das cargas dos modelos serão estáticas, não considerando nenhuma carga dinâmica, essas que podem gerar fraturas no aço por fadigas nas regiões de ligação por solda.

Justifica-se este estudo, pois existe uma cultura entre os profissionais de que o uso de solda nos vergalhões apresenta um mau desempenho e encontram-se poucas pesquisas e dados sobre essa metodologia nesses elementos. Então, torna-se necessário a pesquisa no comportamento do conjunto soldado.

A hipótese deste estudo é comprovar que a solda é um método seguro de ligação entre os vergalhões na armadura de um elemento de concreto armado e que os elementos estruturais apresentam desempenho melhor ou semelhante aos métodos convencionais.

2 OBJETIVOS

Como objetivo dessa pesquisa, buscou-se estudar o comportamento do uso de soldas como método de ligação de vergalhões (CA50 - aço de construção) para armadura de elementos estruturais de vigas de concreto armado, submetidos a ensaio de flexão simples e compará-lo com o método convencional de amarração de armadura por arame recozido.

Assim, os objetivos específicos são:

- Dimensionar os elementos para uma carga de 2 tf;
- Verificar se o aço CA50 possui boa soldabilidade, se o processo de soldagem desenvolve alguma patologia ou na perda de resistência;
- Analisar o desempenho produtivo do processo de solda em relação ao de amarração;
- Comparar o comportamento estrutural dos elementos quando submetidos a flexão simples.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos dias atuais, os produtos e serviços devem baseados em pesquisa e estudo sobre os materiais, como fator de competitividade. O avanço da humanidade esteve, sempre busca alinhar o desenvolvimento às habilidades de produzir e manipular de materiais, buscando a eficiência do processo (Callister, 2018).

Estar atualizado no estudo de materiais inclui, mais do que nunca, saber como produzi-los, aplicá-los e descartá-los ao final dos processos ou da vida útil, de maneira sustentável (BAUER, 2019).

3.1 Materiais de Construção Civil

Os materiais de construção são matérias primas utilizadas na construção ou reforma de prédios, pontes, casas, estradas e outros projetos. Os materiais podem ser retirados de forma direta do meio ambiente como a areia, a água, e pedras ou por meio de processos industriais físicos e/ou químicos, como por exemplo, é o caso de tábuas de madeira, conectores, cimento, portas, ligações hidráulicas e pisos.

Os materiais de construção também podem ser conhecidos de acordo com a suas funções como, por exemplo, vedação que é utilizada para fechar e vedar o ambiente, como janelas, tijolos e portas. Existem também alguns materiais que têm a função de proteger e garantir a durabilidade da edificação, como a proteção de pisos e paredes, revestimentos e pinturas. A terceira categoria é composta por materiais responsáveis por suportar a carga da construção e por transferi-la com segurança para o solo. Estes são conhecidos como materiais estruturais e consistem em aço, concreto, blocos estruturais e estruturas metálicas (BAUER, 2019).

3.1.1 Cimentos e seus tipos

Cimento Portland é um aglomerante hidráulico artificial, obtido pela moagem de clínquer Portland, sendo geralmente feita a adição de uma ou mais formas de sulfato de cálcio, segundo a ABNT NBR 11172: 1990.

As propriedades físicas do cimento Portland são consideradas sob três aspectos distintos: propriedades do produto em sua condição natural, em pó, da mistura de cimento e água e proporções convenientes de pasta e, finalmente, da

mistura da pasta com agregado normalizado (argamassa com areia normal, conforme a ABNT NBR 7214: 2015).

As propriedades da pasta e argamassa são relacionadas com o comportamento desse produto quando utilizado, ou seja, as suas propriedades potenciais para a elaboração de concretos e argamassas. Tais propriedades se enquadram em processos artificialmente definidos nos métodos e especificações padronizados, oferecendo sua utilidade quer para o controle de aceitação do produto, quer para a avaliação de suas qualidades para os fins de utilização dos mesmos (BAUER, 2019).

A quantidade de cimento e concreto (ou seja, a proporção dessas misturas) é muito importante para se obter um produto de alta qualidade, por isso precisam ser padronizados. Cada país tem recomendações sobre como obter diferentes padrões técnicos de cimento e concreto para diferentes aplicações.

Segundo Silveira (2016), no Brasil, existem 6 opções de cimento no mercado de construção civil:

Cimento Portland Comum (CP I): É cimento sem quaisquer aditivos exceto argamassa, que é usada para controlar a pega (o tempo que leva para o composto endurecer parcialmente). Quando as propriedades especiais (como cura rápida ou alta plasticidades) do cimento não são necessárias, é recomendável usá-lo em estruturas de concreto. É padronizado pela ABNT NBR 5732.

Cimento Portland Composto (CP II): Adiciona uma pequena quantidade de escória, pozolana ou filler. Sua composição atende à norma ABNT NBR 11578. Por ter desempenho comparável ao do CP I, pode atender plenamente às necessidades da maioria das aplicações.

Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) – (Utilizado nesse trabalho): Padronizado pela ABNT NBR 5735, esse cimento pode conter escória de alto forno, que representa de 35% a 70% de sua massa. Devido à sua elevada impermeabilidade e durabilidade, baixo calor de hidratação, elevada resistência à expansão e resistência ao sulfato (reação álcali-agregado), este cimento é utilizado em projetos de concreto em massa (como a construção de barragens).

Cimento Portland Pozolânico (CP IV): Sua cinza vulcânica (derivada do nome de cinza volante natural ou artificial na cidade italiana de Pozzuoli) é responsável por 15% a 50% de sua massa. É padronizado pela ABNT NBR 5736. Devido à sua baixa permeabilidade, alta durabilidade e alta resistência ao

envelhecimento, é recomendado para projetos expostos à água da torneira e ambientes corrosivos.

Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI): Como esse cimento atingiu alta resistência no primeiro dia de uso, ele é utilizado por fábricas de blocos, lajes de pavimentação, tubos, lajes, meios-fios, colunas, colunas e componentes de construção pré-fabricados, que requerem cimento de alta resistência inicial para deformar rapidamente. Esse desempenho pode ser obtido pelo uso de doses específicas de calcário e argila na produção de clínquer e por moagem fina de cimento padronizado pela ABNT NBR 5733.

Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS): Possui alta resistência ao sulfeto e é padronizado pela ABNT NBR 5737. É recomendado para projetos em ambientes corrosivos, como redes de esgoto e projetos costeiros, subterrâneos e marítimos.

3.1.2 Agregados utilizados

De acordo com Silveira (2016), agregados são nomes de minerais usados na construção civil: areia, cascalho e brita. Os agregados da indústria da construção são os insumos mais consumidos no mundo. O agregado consiste em um material granular sem volume e tamanho definidos, mas com tamanho e características adequadas, podendo ser utilizado na construção civil. Os fragmentos podem ser classificados de acordo com sua origem, densidade e tamanho. Quanto à fonte, podem ser chamados de agregados naturais e artificiais.

O material extraído em fragmentos é denominado agregado natural, sendo a forma como o material se encontra em sua área de origem (depósito), como: areia e cascalho. Os agregados artificiais são materiais extraídos em blocos e devem passar por um processo de fragmentação, como cascalho e areia de brita. Considerando a densidade, há agregados leves (pedra-pomes); agregados comuns (cascalho, areia, brita); agregados pesados (barita, magnetita).

Quanto ao tamanho dos fragmentos, são: pequenos agregados, materiais com diâmetro de 4,8mm a diâmetro mínimo de 0,075mm (especificado pela norma ABNT NBR 7211). Quanto à origem pode ser encontrada na forma de fragmentos ou produzida por esmagamento.

Agregado graúdo ou cascalho também é definido como um material com diâmetro mínimo de 4,8 mm e diâmetro máximo de 152 mm, conforme especificado pelas mesmas normas acima. Como exemplo de agregado grosso, inclui cascalho e brita.

As propriedades físicas e químicas da mistura de agregado e aglutinante são fatores importantes para a longevidade da estrutura (engenharia) na qual são usados, pois em caso de colapsos estruturais, pode-se concluir que o motivo é a escolha e o uso indevido dos agregados. A mineração dos agregados em suas áreas de origem (pedreiras, depósitos sedimentares) depende basicamente de três fatores: a qualidade dos materiais, a quantidade e o transporte de materiais úteis, ou seja, a localização geográfica do depósito. Esses agregados são utilizados principalmente na fabricação de concreto, blocos para edifícios de alvenaria, proteção de barragens, cascalho para ferrovias, leitos de aeroportos e rodovias, cerâmicas, pavimentação na indústria de vidro e blocos de estradas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A qualidade do agregado é de extrema importância, sendo em algumas situações, componente limitante da resistência mecânica do concreto endurecido. Além disso, as características dos agregados podem ter grande influência sobre a durabilidade e o desempenho estrutural (Klein, 2008).

Agregados são matérias-primas minerais de grande importância para a sociedade. São materiais granulares, com faixas de tamanho estabelecidas (agregados graúdos, de 4,75 a 75 mm; agregados miúdos, de 0,075 a 4,75 mm), utilizados na pavimentação, em lastros de ferrovias, obras geotécnicas, concretos, argamassas e em construções em geral (BAUER, 2019).

Os agregados utilizados para produção de concreto são classificados quanto a sua origem, quanto à dimensão dos grãos e quanto à sua massa unitária.

No que diz respeito à origem, os agregados podem ser classificados em natural, escovado, artificial e reciclado. Os agregados naturais são aqueles encontrados na já pronta natureza a serem usados sem qualquer outro tipo de beneficiário que não sejam lavados, das rochas da crosta e que não estão sujeitos a processos de confio (Aguiar, 2006).

Agregados britados são os provenientes de processos de fragmentação mecânica de rochas. Esses agregados são produzidos em pedreiras instaladas nos

entornos de rochas, utilizando técnicas de desmonte, seguida por britagem e seleção granulométrica (Souza Junior, 2007).

Agregados artificiais são os derivados de processos industriais, como a argila expandida. Já os reciclados são resíduos com características adequadas ao uso, submetidos ou não a beneficiamento.

A NBR 7211/2009 é a norma que classifica o tamanho dos grãos em agregado graúdo e miúdo. São classificados agregados graúdos aqueles que possuem grãos passantes pela peneira de 75 mm e ficam retidos na peneira 4,75 mm. Já os agregados miúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira 4,75 mm, mas ficam retidos na peneira 150 μm .

Ainda sobre a dimensão dos grãos, a NBR 9935/2005 classifica de filler o material granular passante na peneira 150 μm e de material pulverulento as partículas com dimensão inferior a 75 μm .

Quanto a massa unitária, tem-se os agregados naturais que apresentam massa unitária entre 1520 e 1680 kg/m^3 , esses são utilizados para produzir concretos normais com massa específica próxima de 2400 kg/m^3 . Existem também os agregados leves com massa unitária inferior a 1120 kg/m^3 e os agregados pesados com massa unitária superior a 2080 kg/m^3 , esses dois tipos de agregados são para finalidades especiais (Souza Junior, 2007).

3.1.2.1 Areia

A areia é uma substância natural que se origina da decomposição de rochas. A granulometria dos agregados miúdos utilizados no concreto varia de 0,05 a 5 mm de acordo com a norma ABNT. Na verdade, todas as rochas estão sujeitas a areia devido à quebra mecânica, mas os mais vantajosos são os minerais com alto teor de quartzo, pois esse mineral permanecerá após a decomposição física e / ou química.

A areia é composta principalmente por quartzo, que é uma espécie de mineral SiO_2 amplamente presente na crosta terrestre, sendo responsável por cerca de 12% do composto (SILVEIRA, 2016).

De acordo com o tamanho e a pureza das partículas, a areia tem uma finalidade específica. Metais com baixo teor de ferro podem ser usados na fabricação de vidros e nas indústrias cerâmicas e refratários. A indústria de ferro e aço usa areia com alta concentração de sílica para fazer ligas de ferrosilício. A areia

mais grossa e menos pura é usada na construção civil, e a areia mais fina é usada como abrasivo. Os materiais mais comuns são areia de quartzo e granito ou pó de calcário (aproximadamente 20% do volume de britagem) (ANEPACC, 2015).

3.1.2.2 Brita

Os tipos de rochas utilizadas para produzir cascalho são: granito e gnaisse-85%; calcário e dolomita-10%; basalto e diabásio-5%. O Estado de São Paulo responde por aproximadamente 30% da produção nacional. Outros estados produtores importantes são Minas Gerais (12%), Rio de Janeiro (9%), Paraná (7%), Rio Grande do Sul (6%) e Santa Catarina (4%) (FRAZÃO, 2002).

A forma e a superfície do grão também têm impacto. Portanto, a superfície arredondada e lisa reduz a porosidade entre as partículas e promove a fluidez do concreto. A forma angular e a superfície rugosa promovem a adesão do cimento (SILVEIRA, 2016).

Os materiais classificados como agregados de origem artificial são relativamente grossos em tamanho. A pedreira usa a área de prospecção geofísica como fonte de identificação das jazidas. Eles exploram rochas cristalinas com coberturas fracas. O estado físico da rocha não muda muito, as mais recomendadas para fabricação da brita são as que contêm rochas de feldspato contendo quartzo, como granito e gnaisse. No entanto, às vezes rochas como basalto e calcário microcristalino também são exploradas para esse fim. A textura da rocha geradora deve ser viscosa, não muito espessa, com baixa porosidade e ou estrutura isotrópica. O xisto não é recomendado, pois apresenta as características de acamamento, foliação fina e microfissuras.

A produção de agregados para construção civil está espalhada por todo o país. O número de usinas produtoras de brita é de cerca de 996 unidades, sendo grande maioria empresas patriarcais. Essas empresas criaram cerca de 15.000 empregos diretos, tendo como 60% da produção anual, inferior a 200.000 toneladas; 30%, entre 200.000 toneladas / ano e 500.000 toneladas / ano; e 10%, mais de 500.000 toneladas / ano. Existe cerca de 2.000 empresas especializadas em mineração de areia e cascalho, a grande maioria das quais são pequenas empresas familiares, criando cerca de 45.000 empregos diretos. Entre eles, 60% têm uma

produção anual de menos de 100.000 toneladas; 35%, 100.000 a 300.000 toneladas por ano; e 5%, mais de 300.000 toneladas por ano (FRAZÃO, 2002).

3.1.2.3 Aditivos

Paillère et al (1992 *apud* KLEIN, 2008) define aditivos como materiais orgânicos ou inorgânicos, líquidos ou sólidos, inseridos nos concretos, argamassas ou pastas em quantidades que não chegue a 5% sobre a massa de cimento ou materiais cimentícios. Os aditivos influenciam na hidratação do cimento, através de efeitos químicos ou físicos, alterando uma ou mais propriedades do concreto, argamassa ou pasta em estado fresco ou endurecido.

A variedade de aditivos existentes é bastante vasta, mas os mais utilizados são os redutores de água ou plastificantes, redutores de água de alta efetividade ou superplastificantes, aceleradores de pega, retardadores de pega e incorporadores de ar (Neville, 2015).

Aditivos superplastificantes permitem reduzir a quantidade de água de amassamento necessária ao concreto sem alterar a consistência do material no estado fresco ou, aumentar a fluidez do concreto fresco sem que para isso seja aumentada a quantidade de água presente na mistura ((Aguiar, 2006).

Segundo Klein, (2008), os aditivos superplastificantes podem reduzir até 30% da água de amassamento, enquanto os plastificantes permitem reduções de somente 10 a 15%.

Um aspecto importante no uso de aditivos é a quantidade manipulada. Sabe-se que a viscosidade da pasta de cimento diminui com o aumento da quantidade de super plastificante, porém, existe um teor ótimo para o uso desse chamado ponto de saturação, que é quando se obtém a dispersão máxima das partículas de cimento. Doses maiores de aditivo podem causar efeitos negativos como o atraso na pega, segregação e aumento do custo do concreto (Klein, 2008).

3.1.2.4 Água

A qualidade da água de amassamento utilizada é fundamental para a produção de concretos de adequado desempenho, pois a presença de impurezas pode ser responsável por efeitos negativos na resistência mecânica do concreto, por causar manchas na superfície deste material ou até mesmo provocar corrosão das

armaduras. A questão da classificação da agressividade da água, que pode estar em contato com as estruturas de concreto, é um assunto que não recebe a atenção necessária nas publicações de normas e especificações, tanto nacionais quanto internacionais (BAUER, 2019).

3.1.3 Concreto Simples

O Concreto é um composto com características que dependem da proporção, propriedades e interação de seus componentes. A escolha e adequação dos materiais do concreto tem papel fundamental na composição de um concreto de alta performance (NEVILLE, 2015).

Segundo a American Society for Testing and Materials (ASTM), o concreto é um material compósito, que é composto de um meio aglomerado no qual partículas de diferentes propriedades se condensam.

Sua composição se resume em: aglutinante que é o cimento na presença de água. Agregado é qualquer material particulado, como areia, cascalho, seixos, cascalho, escória de alto-forno e resíduos de construção e demolição; se as partículas do agregado forem maiores que 4,75 mm, o agregado é considerado grosso. Caso contrário, a quantidade total é muito pequena, os aditivos são produtos químicos adicionados ao concreto em estado fresco, que irão alterar certas características para adaptá-lo às necessidades do edifício (Martins, 2018).

O concreto é utilizado em diversas edificações como edifícios, rodovias, pontes, torres de resfriamento, usinas hidrelétricas e nucleares, instalações de saneamento e até plataformas móveis de produção de petróleo. Estima-se que consumo anual atinja a 11 bilhões de toneladas de concreto e, segundo dados da IBRACON (2009), o um habitante em média consome em média 1,9 toneladas de concreto por ano, menos que o consumo de água.

Ele é um material que, após o endurecimento, possui resistência semelhante à da rocha natural, e quando no estado fresco é um composto plástico que pode ser modelado nas mais diversas formas e tamanhos. As duas características que o fazem se destacar no grupo de materiais de construção civil são: resistência à água - ao contrário do aço e da madeira, o concreto sofre menos danos quando exposto à água. As razões de sua utilização em estruturas de controle, armazenamento e transporte de água. Sua plasticidade, muito utilizada em várias obras arquitetônicas,

isso possibilita a obtenção de formas estruturais inusitadas. Mas há outras vantagens: a disponibilidade de seus elementos constituintes é alta e o custo é baixo (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

“Em termos de sustentabilidade, o concreto armado consome muito menos energia do que alumínio, aço e vidro e geram menos poluentes e gases proporcionalmente”, disse o chefe do laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Arnaldo FortiBattagin.

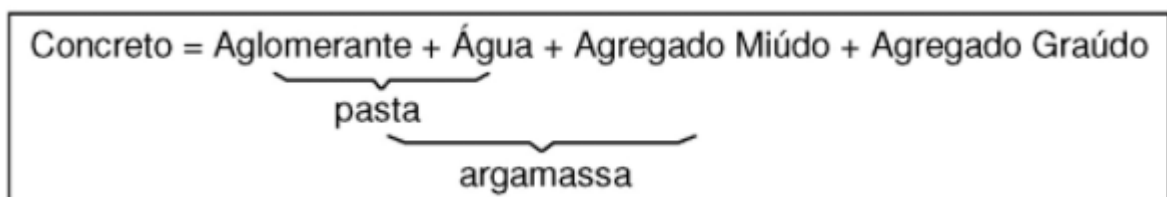
O concreto armado necessita de grandes quantidades de matérias-primas que são, em sua maioria, compostas por materiais não renováveis, além de consumir enormes quantidades de água e de energia para o seu beneficiamento. Nesse processo há também emissões de gases e produção de resíduos perigosos (BENTO, 2016).

De acordo com a responsável pela CB-18, Inês Battagin, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), define que:

(...) “O concreto é uma mistura homogênea composta por cimento e grandes e pequenos agregados. Pode ser misturado com ou sem componentes secundários (aditivos químicos e aditivos), e seu desempenho pode ser exercido pelo endurecimento da pasta de cimento”

Em resumo, podemos definir o concreto a partir da

Figura 1 - Definições de concreto.



Fonte: (CLÍMACO, 2016)

3.1.4 Concreto Armado

O concreto é um material muito plástico, com alta resistência a compressão e baixa resistência à tração. Para superar a deficiência na resistência à tração do concreto, foi criado o concreto armado, o qual possui armação de aço em seu interior, aliando as características dos dois materiais de forma solidária, fazendo com que a aderência entre eles faça com que ambos trabalhem juntos para resistir às tensões, sejam elas de tração ou compressão (JUNIOR, 2007).

O concreto armado (também chamado de concreto reforçado com cimento ou CCR) é um material compósito em que a resistência à tração relativamente baixa do concreto pode ser compensada pela inclusão de um agente de reforço com maior resistência à tração ou ductilidade. Os vergalhões são geralmente enterrados passivamente no concreto antes de o concreto ser montado. As soluções de reforço são geralmente projetadas para suportar tensões de tração em certas áreas do concreto, que podem causar rachaduras e / ou danos estruturais inaceitáveis. O concreto armado moderno pode conter vários materiais de reforço feitos de aço, polímero ou outros materiais compostos, e se é usado com barras de aço. O concreto armado também pode ser tensionado permanentemente (concreto comprimido, concreto tensionado) para melhorar o desempenho da estrutura final sob carga de trabalho. Os métodos mais utilizados são o pré-tensionamento e o pós-tensionamento (REBELLO, 2007).

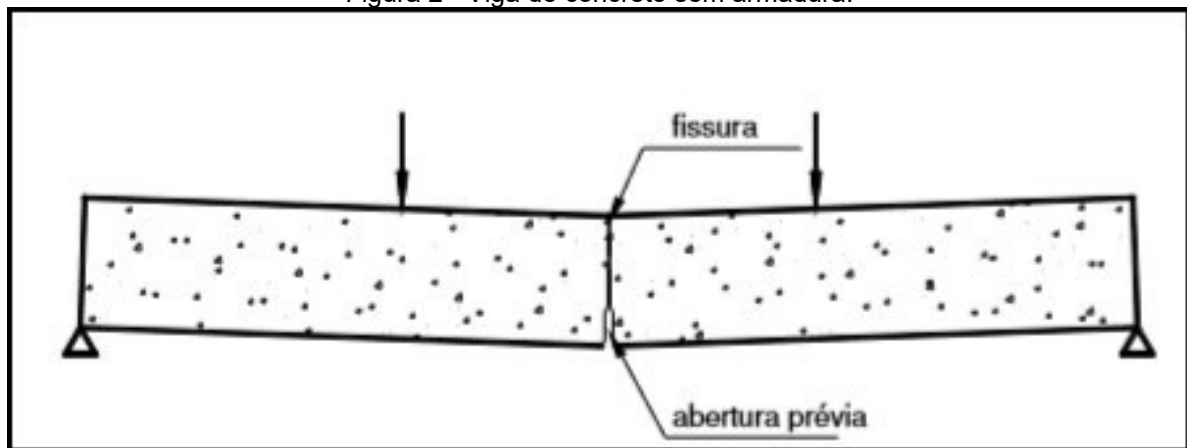
É um elemento artificial que une as qualidades do aço e do concreto, podendo assumir qualquer forma por ser facilmente modelável, além de proporcionar proteção ao aço contra a corrosão, já que o concreto o envolve por inteiro. Ou seja, o concreto armado é a união do concreto simples com a armadura, sendo que, entre eles, deve haver aderência e solidariedade para resistirem corretamente aos esforços solicitados (SOARES, VASCONCELOS e NASCIMENTO, 2015).

As armaduras utilizadas no concreto armado são conhecidas como armaduras passivas, ou seja, “as tensões e deformações nela existentes devem-se exclusivamente às ações externas aplicadas na peça” (BASTOS, 2021)

Para uma estrutura forte, dúctil e durável, o reforço deve ter pelo menos as seguintes características: alta resistência relativa; alta tensão de tração; não afetado por pH, umidade e fatores semelhantes, boa conexão com o concreto; compatibilidade térmica, para não causar tensões inaceitáveis (como expansão ou contração) devido às mudanças de temperatura, por exemplo, durabilidade e durabilidade em um ambiente de concreto, independentemente da corrosão ou tensão sustentada (REBELLO, 2007).

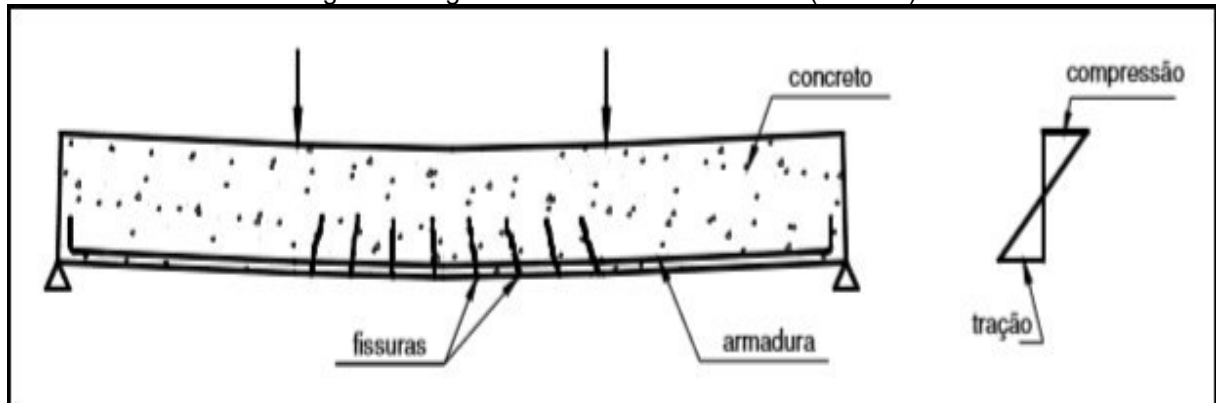
Com o concreto e a armadura trabalhando de forma aderente em uma viga, por exemplo, sua capacidade de resistir à flexão aumenta em relação ao concreto comum. A seguir, as figuras 2 e 3 mostrar a aparição de fissuras em uma viga em concreto e em outra de concreto armado, respectivamente.

Figura 2 - Viga de concreto sem armadura.



Fonte: (BASTOS, 2021)

Figura 3 - Viga de concreto com armadura (armado).



Fonte: (BASTOS, 2021)

Vários tipos diferentes de estruturas e componentes que são inseridos em sua estrutura podem ser construídos utilizando o concreto armado, englobando as lajes, fundações, estruturas, paredes, vigas, colunas, etc. O concreto armado pode ser dividido em concreto pré-moldado ou concreto moldado no local (REBELLO, 2007).

Sem reforço, a construção de estruturas modernas com material concreto não seria possível. Segundo Rebello (2007), três características físicas dão ao concreto armado suas propriedades especiais:

1. O coeficiente de expansão térmica do concreto é semelhante ao do aço, o que elimina a grande tensão interna causada pela diferença na expansão ou contração térmica.

2. Quando a pasta de cimento dentro do concreto endurece, ela será ajustada de acordo com os detalhes da superfície do aço, de forma que qualquer tensão possa ser efetivamente transferida entre diferentes materiais. O vergalhão é

geralmente áspero ou corrugado para melhorar ainda mais a ligação ou coesão entre o concreto e o aço.

3. O ambiente químico alcalino fornecido pelas reservas alcalinas (KOH, NaOH) e silicato (hidróxido de cálcio) contidos na pasta de cimento endurecido formará um filme passivo na superfície do aço, aumentando assim muito sua resistência à corrosão. Em condições neutras ou ácidas. Quando a pasta de cimento é exposta ao ar, a água do meteorito reage com CO₂ na atmosfera, e o silicato e o hidrato de silicato de cálcio (CSH) na pasta de cimento endurecido são gradualmente carbonatados, e o alto valor de pH muda de 13,5 -12,5 diminuiu gradualmente para 8,5. O pH da água balanceado com calcita (carbonato de cálcio) e aço não é mais passivado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

3.1.5 Características do aço de construção

Os aços de construção, ou comumente chamados de vergalhões, devem atender aos requisitos da norma brasileira NBR 7480:2007 - “Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação”. A norma regula os parâmetros geométricos, como ângulos e espaçamentos das nervuras, massa linear, comprimento, propriedades mecânicas e de soldabilidade (ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007)

A NBR 7480:2007 (ABNT, 2007, p. 2) classifica os elementos da seguinte forma:

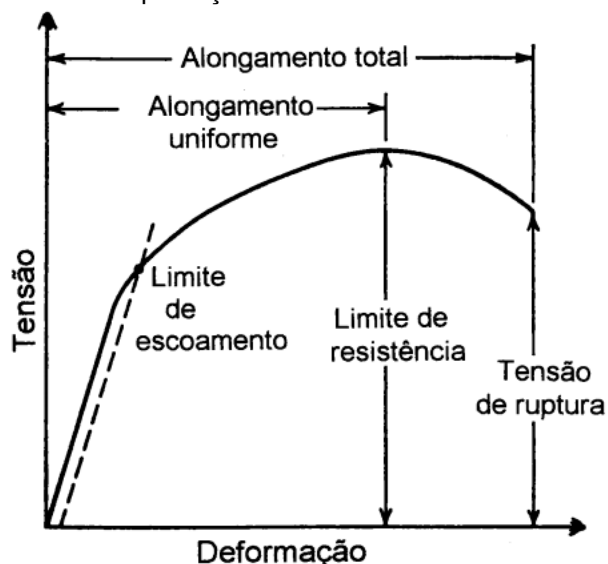
“Barras os produtos de diâmetro nominal de 6,3 mm ou superior, obtidos exclusivamente por laminação a quente sem processo posterior de deformação mecânica. Os produtos obtidos por trefilação ou processos equivalentes com diâmetro nominal de 10mm ou inferior são definidos como fios. Quanto à resistência de escoamento, as barras de aço são classificadas nas categorias CA-25 e CA-50, e os fios de aço na categoria CA-60.”

Ainda em acordo com a norma, os aços devem apresentar homogeneidade quanto as características geométricas, nervuras para facilitar a aderência ao concreto, marcas dos fabricantes, categorias do material e diâmetro nominal. (ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007)

O processo de fabricação de barras de aço pode ser de diversas formas, o que altera suas características intrínsecas, bem como suas propriedades físicas e sua microestrutura, influenciando na fadiga do material. (COLPAERT, 1974)

O ensaio de tração é um ensaio muito utilizado para determinar as propriedades mecânicas de qualquer material. O elemento é solicitado axialmente por uma força de tração que tente a esticá-lo e alongá-lo, até a sua ruptura. Os seus resultados são transcritos para um gráfico que apresenta a relação entre a tensão e a deformação, como mostra a Figura 4. (PADILHA, 2006)

Figura 4 – Exemplificação da Curva de Tensão x Deformação.



Fonte: (PADILHA, 2006)

A Tabela 1, apresentada pela NBR 7480:2007, apresenta algumas propriedades relacionadas aos principais tipos de aço de construção (CA), que são requisitos de propriedades mecânicas para as barras e fios usados no concreto armado. (ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007)

Tabela 1 - Características das barras.

Categoria	Valores Mínimos de tração			
	Resistência característica de escoamento f_{yk} MPa	Limite de Resistência f_{at} MPa	Alongamento após a ruptura em 10Φ A %	Alongamento total na força máxima A_{gt} %
CA-25	250	$1,20 f_y$	18	-
CA-50	500	$1,08 f_y$	8	5
CA-60	600	$1,05 f_y$	5	-

Fonte: Adaptado de (ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007)

Os elementos das ligas (composição química) determinam as propriedades dos aços carbono. O carbono (C) é o elemento principal ao endurecimento do aço. A dureza e resistência à tração aumentam quando o teor de carbono aumenta até cerca de 0,85%. A ductilidade e a soldabilidade tendem a diminuir com o aumento do carbono. O carbono é essencial para os aços que têm de ser endurecidos por têmpera. (MIN)

O teor de carbono somado ao teor de alguns elementos de liga é chamado de carbono equivalente. Os valores máximos admitidos são especificados pela NBR 8965:1985 e são apresentados na Tabela 2. (ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1985)

Tabela 2 - Elementos da Liga do CA50S.

Elemento	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Ce
Especificação (máx. valor admitido)	0,35	0,50	1,5	0,050	0,050	0,55

Fonte: Adaptado de (ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1985)

Para calcular o equivalente de carbono, é necessário determinar o teor aproximado de outros elementos de liga que produzem a mesma dureza que 1% de carbono. O equivalente de carbono (Ce), que é um indicador de temperabilidade, pode então ser calculado a partir da Equação (3.1), que é amplamente utilizada pelo IIW (International Institute of Welding). (FORTES e ARAÚJO, 2005)

$$Ce = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + V + Mo}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (3.1)$$

Após ensaio autônomo, foi determinada a composição química do aço CA-50, como apresenta Alonso 2006 (ALONSO, 2006).

Tabela 3 - Composição Química CA-50.

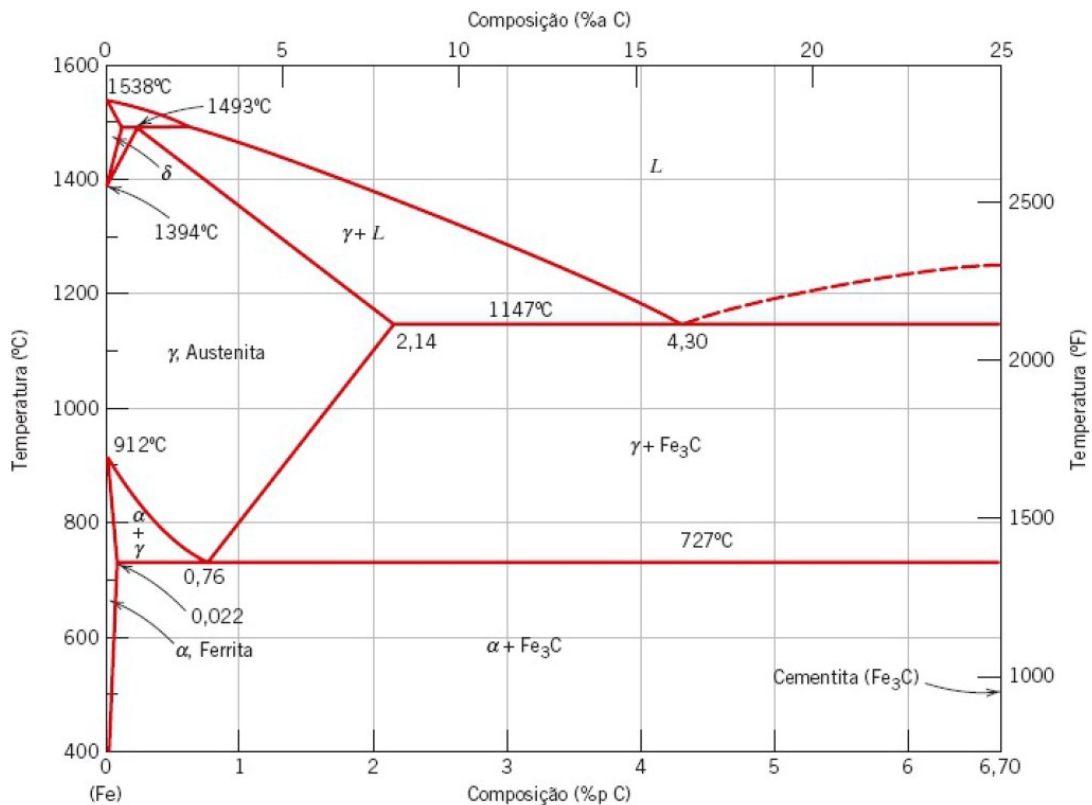
Elementos	Amostra A (%)	Amostra B (%)
C (carbono)	0,214	0,265
Si (silício)	0,198	0,133
Mn (manganês)	0,768	0,718
P (fósforo)	0,0226	0,0419
S (enxofre)	0,0307	0,0338
Cr (cromo)	0,0156	0,1295

Mo (molibdênio)	0,0141	0,0414
Ni (níquel)	-	0,0683
Al (alumínio)	-	-
Ti (titânio)	-	-
Cu (cobre)	0,0153	0,155
Nb (nióbio)	0,0069	0,0083
V (vanádio)	0,0019	-
Sn (estanho)	-	0,0207
Fe (ferro)	98,71	98,39

FONTES: (ALONSO, 2006)

As propriedades mecânicas dos metais dependem de sua composição química e arranjo microestrutural, que são alteradas nos processos mecânicos e térmicos dos métodos de fabricação dos aços. Uma forma de se conhecer a microestrutura dos materiais metálicos é a partir do diagrama de fases, no caso para os aços, *Fe – C*, que relaciona a % de teor de carbono relacionadas a suas temperaturas, como é apresentado na Figura 5. A estrutura primária do aço é a austenita, existente a temperatura entre 912° e 1495°. (COLPAERT, 1974)

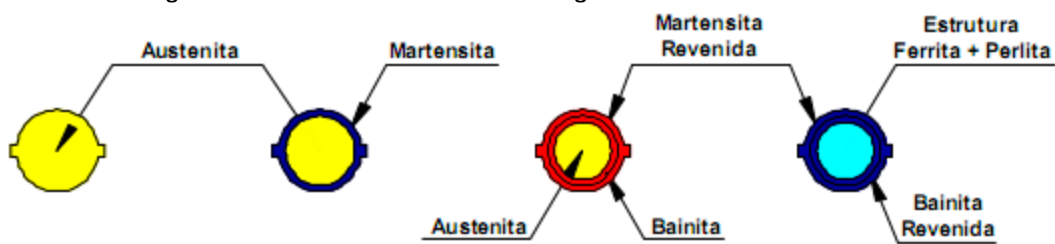
Figura 5 - Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro.



FONTE: (CALLISTER, 2018)

Quando o elemento de barra é submetido ao tubo de resfriamento (thermex) durante os processos de fabricação, a transformação de fases ao longo da seção transversal se distribui entre fases, como apresenta a Figura 6. (FILHO, 2004)

Figura 6 - Microestruturas de um vergalhão submetido ao themex.



Fonte: Adaptado de (FILHO, 2004)

3.2 Engenharia de Estruturas

A função da estrutura em uma edificação é garantir que os esforços que estão sendo solicitados em função sobre a edificação estão sendo submetida e a outros esforços ambientais, tais como vento (GARRISON, 2018).

3.2.1 Vigas

Segundo a ABNT (1989, p.2, item 3.10), “Considera-se como viga um elemento linear não continuamente apoiado, podendo estar, ou não, contido nas paredes”.

3.2.1.1 Comportamento das vigas submetidas a esforços de flexão

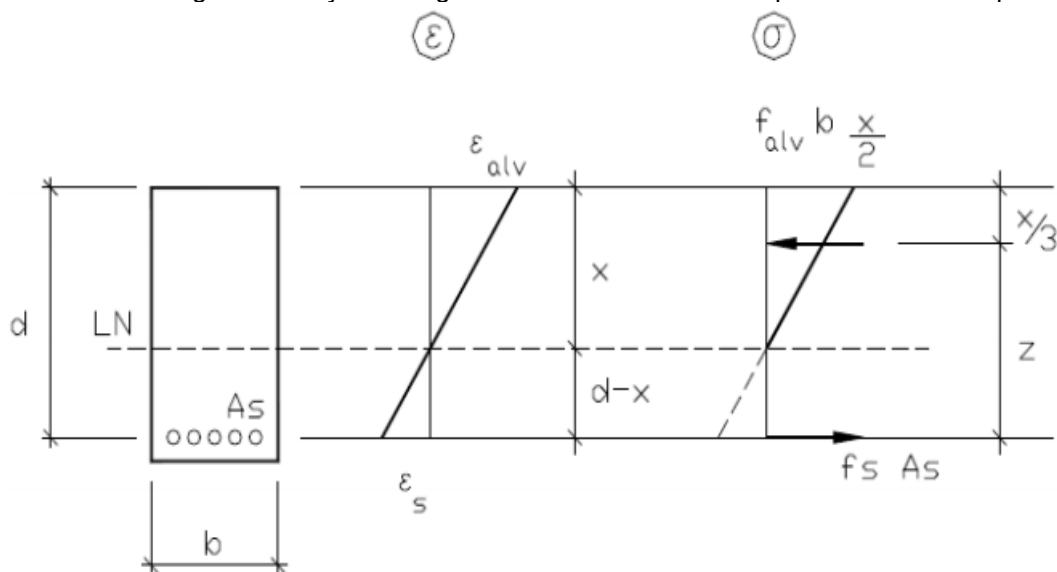
Em projetos de alvenaria estrutural, é necessário determinar-se a capacidade portante ou o dimensionamento de elementos de alvenaria submetidos à flexão simples (Altran, 2010). Parâmetros que se devem conhecer são os k_x e k_z adimensionais empregados no equacionamento da flexão, que relacionam a posição da linha neutra e o braço de alavanca com a altura útil da seção d , onde x é a ordenada que fornece a posição da linha neutra e z , o braço de alavanca entre as resultantes de tração e compressão na seção, conforme figura a seguir, definindo-se k_x e k_z na forma:

$$k_x = \frac{x}{d} \quad (3.2)$$

$$k_z = \frac{z}{d} = 1 = \frac{k_x}{3} \quad (3.3)$$

Da mesma forma, em um projeto balanceado, ao realizar operações em m , k_x é representado por k_b ; e k_z , para k_z , b . A seguir, a seção retangular de uma viga de alvenaria com estrutura reforçada simples ainda é mostrada na figura abaixo. A alvenaria retangular foi submetida à flexão e sua deformação e distribuição de tensões. As dimensões são fornecidas de acordo com Altran, 2010.

Figura 7 - Seção retangular submetida à flexão simples-armadura simples



onde: z =braço de alavanca; x =profundidade da linha neutra; d =altura útil; b =largura da seção; f_{alv} =máxima tensão de compressão na alvenaria; f_s =tensão de tração nas armaduras; ϵ_{alv} e ϵ_s = máximas deformações na alvenaria e armadura; A_s =área da armadura

Fonte: Altran, 2010

3.2.2 Armaduras de elementos de CA

As barras de aço incorporadas à peça de concreto são denominadas armadura passiva, quando seu objetivo é apenas de resistir às tensões provenientes das ações atuantes, sem introduzir nenhum esforço adicional à peça. Ou seja, as armaduras em peças de concreto armado só trabalham se houver solicitação. Por exemplo, enquanto uma viga estiver escorada e, portanto, sem atuação de cargas externas, as barras de aço não sofrem tensões, a não ser aquelas originadas pelo processo de endurecimento do concreto (CLÍMACO, 2016).

3.2.2.1 Armadura Longitudinal

Armadura formada por varões de aço dispostos paralelamente à superfície de um elemento estrutural, de acordo com o seu eixo longitudinal. Este tipo de armadura é constantemente utilizado em vigas para resistir aos momentos fletores (Engenharia Civil, 2021)

3.2.2.2 Armadura Transversal

A contribuição das barras transversais de aço para a resistência ao cisalhamento das vigas é geralmente calculada por analogia de vigas fissuradas com treliças planas (as chamadas "treliças clássicas") e adicionando-as ao concreto, ou por treliça com ângulos variáveis. A diagonal comprimida tem uma pequena contribuição específica. Estribos também proporcionam menor resistência em trincas pela ação de pinos, e aumentam a resistência da área de concreto comprimido por sua restrição (FEG-UNESP, 2021)

3.2.2.3 Aderência dos Vergalhões

Aderência (bond, em inglês) é um recurso que evita que as barras de aço deslizem em relação ao concreto circundante. Portanto, é responsável pela união entre aço e concreto para fazer esses dois materiais funcionarem juntos. A transmissão de forças entre o aço e o concreto e a compatibilidade de deformações entre eles são a base para a existência do concreto armado. Isso só é possível devido à conformidade (FEC-UNICAMP, 2021).

3.2.2.4 Tipos de amarrações em Armaduras

O concreto armado é o sistema estrutural mais utilizado no Brasil e é composto por dois elementos principais: concreto e aço. Conforme informado no site da Neoipsum (2021), as barras de aço podem resistir a tensões de tração em componentes estruturais e devem ser montadas e empacotadas antes da concretagem.

O processo de montagem da armadura pode ser dividido em três etapas. São eles: cortar, dobrar e amarrar.

O processo de corte inclui verificar o tamanho das barras de aço no projeto e cortá-las. Dobrar é a etapa de moldar as barras de aço para formar a armadura. Por fim, a amarração é a etapa de finalização da montagem da armadura, dando sua forma final e fixando (normalmente com arame) as barras de aço cortadas e dobradas.

Para aumentar a produtividade durante o processo de montagem da armadura, já existem no mercado máquinas que podem realizar amarrações simples.

3.2.3 Principais patologias das amarrações

3.2.3.1 Problemas e dificuldades de execução das amarrações

A parte de alvenaria estrutural é de grande importância para todo o processo construtivo, já que é um dos processos iniciais, além de ser o que servirá de sustentação para o recebimento/deposição de mais materiais e do restante da obra, tendo a amarração um grande destaque dentro desse processo (GOECKS, 2011).

As amarrações são, basicamente, materiais usados com a finalidade de amarrar as paredes entre si, de modo a agir conjuntamente, tornando a estrutura mais rígida, unindo os blocos e paredes aos pilares.

A principal dificuldade encontrada na execução desse processo é a correta execução do processo já que, por conta da caracterização do sistema, não pode ser admitido que se insira a amarração “a prumo”, sendo recomendada a aplicação de juntas amarradas. Caso não seja bem executada, por gerar fissuras que vão sendo abertas conforme a estrutura começa a trabalhar, gerando a necessidade de manutenções futuras na estrutura (BASTOS, 2021).

3.3 Soldas

A soldagem corresponde a técnica que possibilita que sejam unidas duas ou mais partes de uma determinada estrutura, permitindo que haja a continuidade entre material e as características mecânicas e químicas, assim como os esforços aos quais a ligação está sujeita dependendo de sua localização. Embora seja dado como processo de união, parte desses processos são aplicados como forma de deposição de material sobre uma determinada superfície, buscando a recuperação pelo desgaste ou para que seja formado um novo revestimento (ALMEIDA, 2006).

Podem ser adotados diferentes processos para realizar a união das peças, cujos aspectos dessas operações variam de acordo com a necessidade e tipo de material, de modo semelhante à especificidade de processos de conformação que

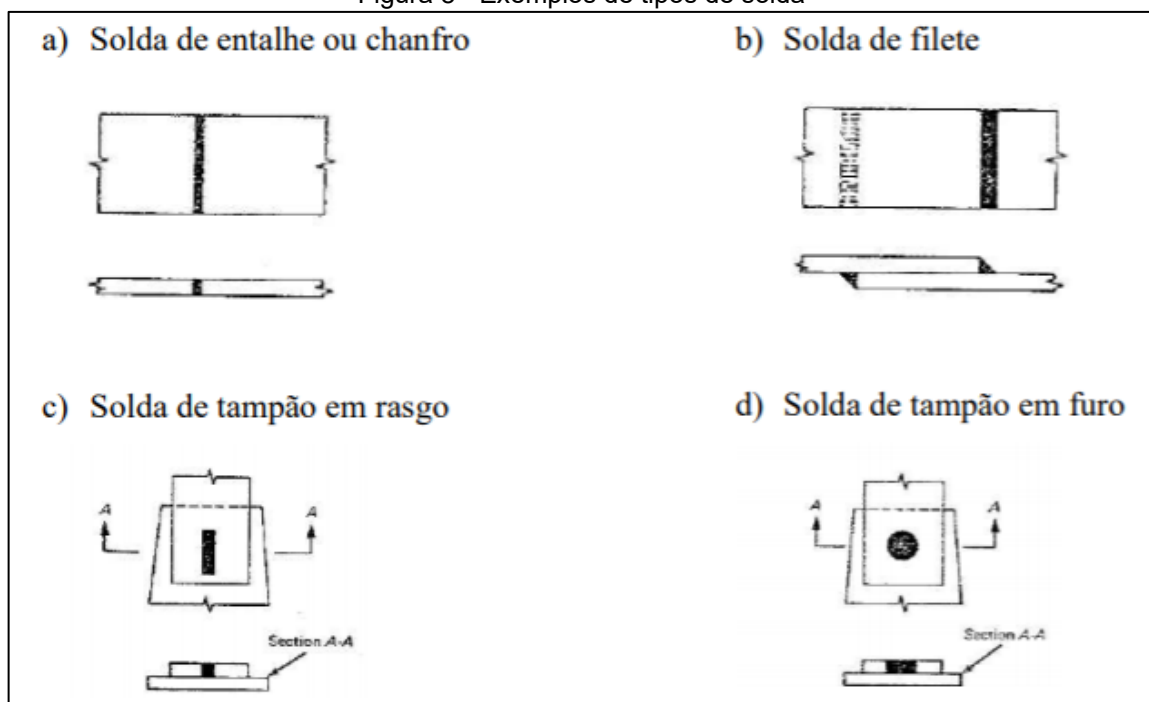
variam conforme material e finalidade. Dessa forma, é importante que sejam exemplificados os tipos de soldagem para compreensão dessas condições.

3.3.1 Tipos e Características da Soldas

Há uma série de processos de soldagem, que foram sendo aprimorados ao longo do tempo. Entre elas, podem ser destacados os tipos de arco submerso (SAW), processos em atmosfera gasosa (GMAW – MIG, MAG e TIG), processo com eletrodo revestido (SMAW), processos com arame tubular (FCAW) e processo eletro-escória.

As soldas podem ser classificadas tanto pela sua posição como pelo tipo. Com relação às posições, essas podem ser planas, horizontais, verticais e sobre cabeça ao passo que os tipos podem ser de filete, entalhe/chanfro, ranhura e tampão. É possível observar os tipos de soldas através da Figura 4.

Figura 8 - Exemplos de tipos de solda



Fonte: Kou (2003)

No processo de soldagem SAW (arco submerso), forma-se um arco entre a peça e a porção final do consumível, onde ambos estão dotados de cobertura de fluxo granular, mantendo o arco escondido (Marques, 2007). Suas principais aplicações são dadas a fabricações de vasos de pressão, sistemas marítimos, plataformas e tubulações, assim como na recuperação e revestimento de peças

cilíndricas laminadas pela sua alta velocidade de soldagem admissível, além da alta integridade e altas taxas de deposição, mesmo que limite sua atuação em posições plana e horizontal e limite o sistema às juntas em linha.

No processo GMAW (atmosfera gasosa), há o processo de soldagem de peça com polaridade negativa envolta em atmosfera gasosa de proteção, realizando o fechamento de um circuito quando há contato do consumível com a peça, gerando circulação de corrente e gerando aquecimento até a deposição do material, gerando uma poça de fusão. Pode ser do tipo MIG (Metal inert gás) quando o gás aplicado à proteção é inerte, MAG (Metal active gás) quando este gás aplicado para proteção é ativo, e TIG (tungsteninertgas), cujo eletrodo utilizado é formado de tungstênio e o gás inerte é composto em sua maioria por argônio, hélio ou uma mistura de ambos., sendo considerado como processo GTAW (Gas-ShieldedTungstenArcWelding).

A soldagem FCAW (arames tubulares) assemelha aos processos MIG/MAG, com a diferença que o arame aplicado é tubular, possuindo fluxo em seu interior, fazendo com que apresente características especiais, aumentando a qualidade e a estabilidade do arco, reduzindo volume de respingos. Por conta da sua concepção, garante uma melhor produtividade, reduzindo custos e amentando lucratividade. Outro sistema de soldagem é por eletrodo revestido, tal qual será discutido de modo mais efetivo a seguir.

3.3.2 Solda de Eletrodo Revestido

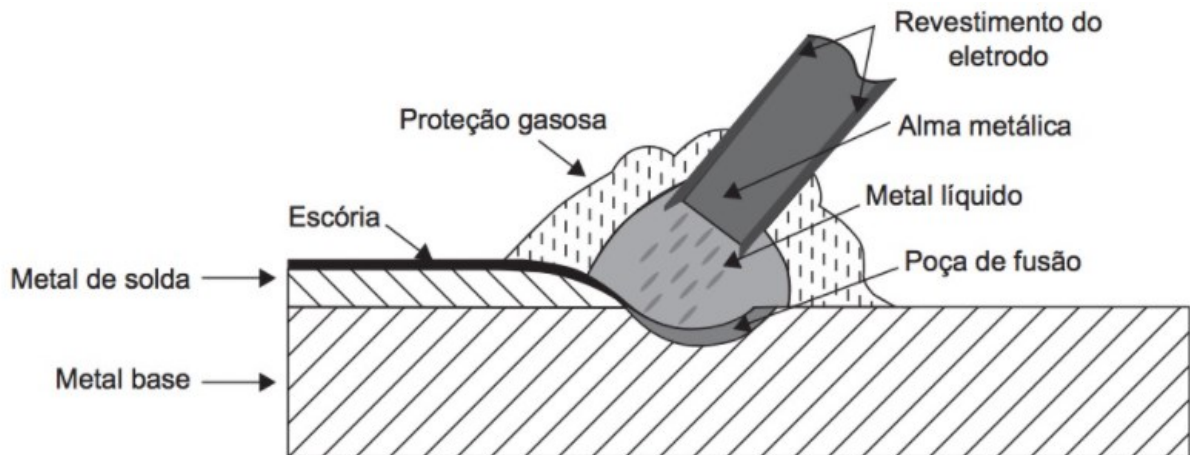
O processo de eletrodo revestido (SMAW – Shielded Metal ArcWelding) é um dos processos que possui uma maior facilidade de operação, admitindo investimentos baixos em material, além da facilidade de se encontrar os eletrodos no mercado (Goecks, 2011). Há uma grande vantagem nesse processo que se dá pelo controle de composição química do revestimento, por meio da capacidade de adquirir uma série variada de consumíveis, e a maioria deles ser dotada de controle de microestrutura e das propriedades do material usado para a solda.

3.3.3 Processos de Soldagens

O processo ocorre por meio de um sistema de arco, onde a união das peças é feita pelo calor do arco que é criado entre o eletrodo revestido e a junta que receberá a deposição de material (Marques, 2007). O corão, quando depositado, é

protegido por uma atmosfera gerada por oxigênio e nitrogênio pela escória e pelos gases gerados, cujo metal fundido é transferido e forma uma poça fundida que é protegida por esses gases e pelo banho de escória, gerados pela queima dos componentes do revestimento, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 9 - Processo de soldagem por eletrodo revestido

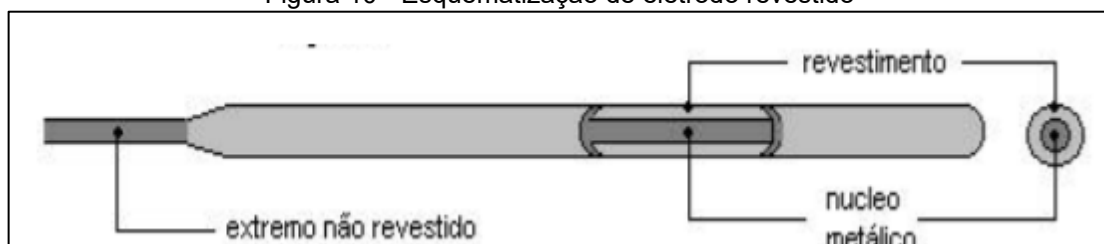


Fonte: (DOS SANTOS, 2015)

O processo é um dos mais aplicados em todo o mundo pela versatilidade e vasta gama de aplicações, embora não seja dos mais eficientes, possuindo uma eficiência de deposição que varia entre 60% e 70%, sendo menor que outros tipos de processos, que possuem eficiência acima de 80%. Esse processo caracteriza-se por ser totalmente manual, utilizando-se normalmente fontes de correntes constante que possuem tensões que variam entre 50 e 100 volts, atuando com tensão de trabalho que pode ir de 15 a 36 volts, gerando juntas com espessura de cerca de 3 a 40 mm e que possuem taxa de deposição entre 1 e 2,5 kg/h.

O eletrodo revestido tem como objetivo tornar-se material a ser inserido no processo de soldagem, tendo a forma de vareta metálica. Essa vareta possui um revestimento por toda sua extensão e uma extremidade que não possui qualquer revestimento e será responsável pelo início do processo de soldagem, como a Figura 7 apresenta.

Figura 10 - Esquemática de eletrodo revestido



Fonte: Kou (2003)

Esse revestimento possui substâncias distintas em sua composição, tal qual determinarão qual a direção que o arco elétrico tomará, assim como os gases gerados e como será a proteção através deles, impactando na forma de proteção do cordão de solda, produção da escória para evitar resfriamento brusco e o contato da solda junto ao oxigênio e hidrogênio atmosféricos, auxiliando também na contenção de alguns elementos de liga (Marques, 2007). Esses eletrodos possuem especificação conforme requisitos exigidos e aplicados pela American Welding Society (AWS) mas, em sua, são especificados de acordo com as propriedades mecânicas que apresentam, a composição química do metal de adição, o tipo do revestimento e a posição de execução da soldagem. Esses são compostos pela ordenação AWS E XXYZ, onde a letra E significa que o eletrodo é aplicado para soldagem a arco, ao passo que os dois primeiros dígitos (XX) correspondem ao limite de resistência mínimo que o metal possui (na escala de 1000 psi), o terceiro dígito (Y) define a posição adequada para a soldagem (1, 2 ou 4), e o último (Z), corresponde ao tipo de revestimento e características, que pode ir de 1 a 8

3.3.3.1 Problemas e dificuldades de Execução

Os defeitos de soldagem podem comprometer a utilidade da junta e reduzi a qualidade do produto final, gerando uma série de condições e riscos à mesma. Com o passar do tempo, foi possível analisar e identificar uma série de problemas relacionados à execução de soldas de modo errôneo, bem como o uso de material de baixa qualidade, que impactam diretamente na qualidade do mesmo (Goecks, 2011). Desse modo, podem ser levantados seis principais problemas relacionados à soldagem com eletrodo revestido que impactam na qualidade do mesmo.

O primeiro deles refere-se a respingos na solda, sendo caracterizado principalmente pelo modo de execução e pela sensibilidade do maquinário, podendo regular-se a amperagem do maquinário de modo a evitar que existam o aparecimento dos respingos por um maior controle da corrente (Marques, 2007). Além disso, essas peças podem estar úmidas ou sujas, o próprio eletrodo pode estar sujo, o comprimento do arco pode ser longo para a dimensão da peça, ou então pode estar havendo interferências magnéticas.

O segundo principal problema corresponde à porosidade, sendo um dos mais críticos por não ser um problema aparente, podendo ser disfarçado pela

camada superficial do material depositado. Normalmente é causado por problemas semelhantes aos respingos, sendo um dos principais agravantes a velocidade empregada para a solda (Kou, 2003).

O terceiro corresponde a mordeduras, caracterizado por descontinuidades da geometria da solda, gerando vincos de pequena magnitude, normalmente em decorrência de uma penetração malfeita do material de solda (Goecks, 2011). Por conta dessa condição, podem aparecer trincas e pontos de corrosão, que tornam a liga e a peça menos resistentes. As principais causas estão relacionadas à velocidade de soldagem, comprimento do arco, diâmetro do eletrodo e a sua umidade, além de altas correntes de soldagem.

O quarto corresponde às escórias internas, cuja ocorrência se dá principalmente devido a não remoção das escórias entre os cordões, podendo também se caracterizar pela ação em uma angulação inadequada ou com movimentos inadequados, carregando escórias externas para a parte interior (Marques, 2007). Para que sejam evitados tais problemas, é necessário que se remova as escórias para que o próximo cordão seja assado, além de aplicar uma escova de aço, por exemplo, para auxiliar no processo.

O quinto corresponde à falta de penetração e fusão, onde o metal não é capaz de atingir de modo totalitário a raiz das peças a serem soldadas, devendo ser evitado a todo custo pois, além de reduzir a resistência da ligação realizada, ainda propicia o surgimento de corrosão em pontos não observáveis (Goecks, 2011). O surgimento desse tipo de problema se dá, em suma, por correntes de soldagem muito baixas, além da abertura excessiva da junta, além de um eletrodo com bitola não condizente com o entalhe.

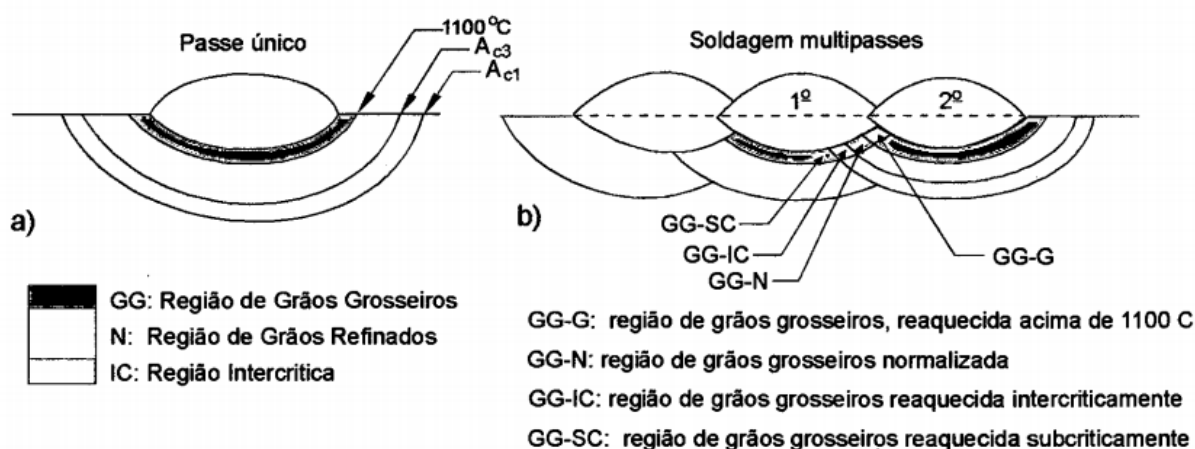
Por fim, a sexta e última falha corresponde às trincas, um dos mais sérios problemas relativos às soldas, uma vez que podem ser tanto aparentes quanto internas e, assim como problemas relacionados à porosidade da peça, reduzem a resistência, porém, de modo mais perigoso, já que permite que haja separação das lâminas, podendo gerar uma grande fissura na peça (Goecks, 2011). Esses problemas podem ocorrer quando, ao fim do cordão de solda, o arco fecha-se de modo brusco, podendo ser evitado através do desligamento do arco a cada vez que um cordão for finalizado.

3.3.4 Zona Termicamente Afetada (ZTA)

Nos processos de soldagem por fusão é utilizada uma fonte de calor para conseguir a solubilização - dentro da fase líquida - dos metais de base e do metal de adição. Na soldagem a arco voltaico, a fonte de calor se movimenta com uma velocidade linear constante e introduz calor no metal numa pequena área, formando uma poça fundida. A zona termicamente afetada (ZTA) é a região compreendida entre a zona de ligação junto ao metal de solda e o metal de base não afetado, isto é, metal cuja microestrutura e propriedades a diferença da ZTA não foram modificadas pelo calor da soldagem. Na soldagem as condições térmicas a que é submetido o material são bastante diferentes daquelas que existem em outros processos de extração, refino e fabricação de metais. O metal de base (MB) do componente a ser soldado alcança elevadas temperaturas e depois esfria rapidamente, de modo que uma parte dele (denominada zona termicamente afetada, ZTA) sofre modificações na microestrutura e propriedades (BOHÓRQUEZ, 2001).

Na soldagem multipasses, as diferentes regiões experimentam múltiplos ciclos térmicos, o que gera um complicado padrão com uma variedade de diferentes zonas de várias microestruturas, com um tamanho da ordem de um milímetro e possuindo propriedades mecânicas particulares, como demonstra a (BOHÓRQUEZ, 2001).

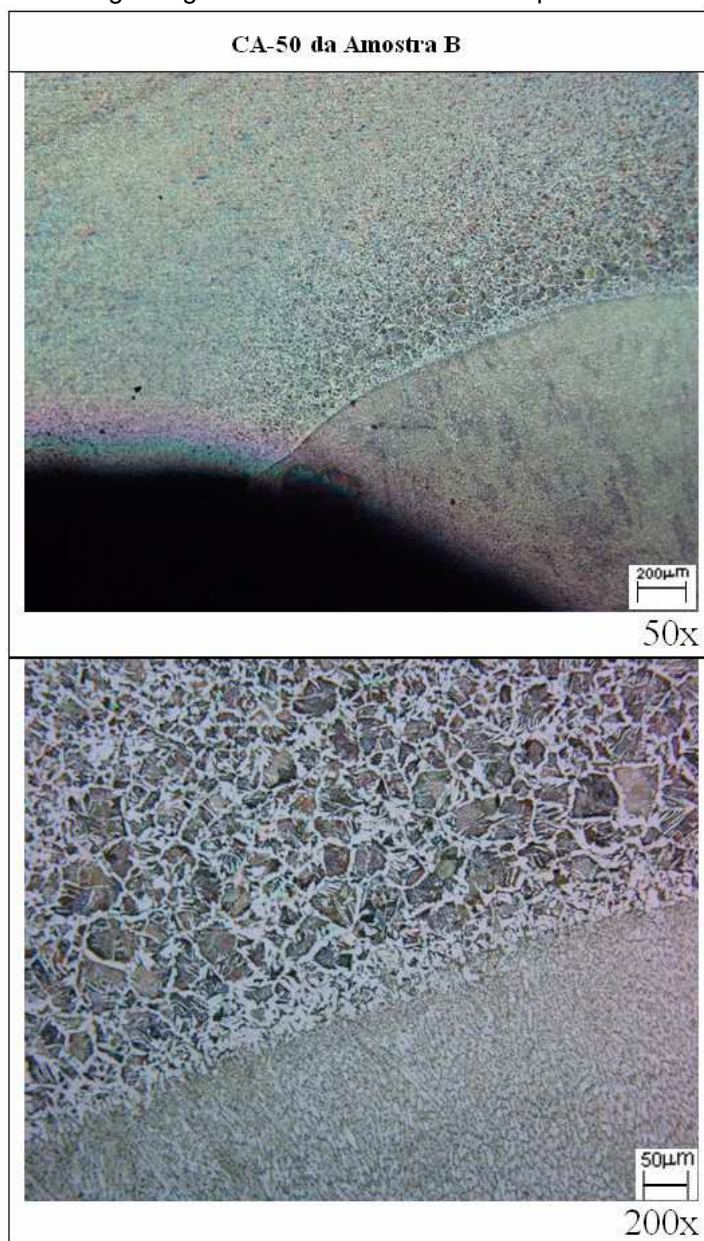
Figura 11 - Nomenclatura das diferentes regiões da ZTA de um passe único, e da ZTA reaquescida numa soldagem multipasses.



FONTE: (BOHÓRQUEZ, 2001)

Em um estudo, o autor Alonso (2009), apresenta o comportamento de solda e o resultado da microestrutura na ZTA sobre um ensaio em vergalhões de CA-50.

Figura 12 - Microestrutura da ZAC junto ao pé do último cordão de solda em CA-50, composta de grãos grosseiros contendo ferrita e perlita.



FONTE: (ALONSO, 2006).

Portanto, dependendo do aporte térmico, ele acaba sendo prejudicial pois diminui a dureza na camada periférica, ocasiona queda da ductilidade da solda. Sua microestrutura é, portanto, composta de grãos grosseiros contendo ferrita e perlita (ALONSO, 2006).

3.4 Armaduras Soldadas para Elementos de Concreto

Ainda que não haja uma especificação normativa para que se use o processo de solda em armadura, é possível observar através da NBR 14.931:2003,

por meio de seu item 8.1.5.5 permite que, no caso de aços soldáveis, essa montagem possa ser realizada através da aplicação de pontos de solda. A aplicação de armaduras soldadas, como descreve Fusco (2008), tem seu emprego bastante difundido em todo o mundo, com destaque às aplicações em países europeus, sendo mais abrangente no Brasil a partir de 2016, já que somente telas soldadas e pequenas armaduras padronizadas eram comercializadas e apenas em pequenas construções, sapatas e elementos pré-fabricados.

Conforme Almeida (2006) relata, a empresa Belgo foi a pioneira em desenvolver o CA-50, elemento soldável formado por rolos que podiam chegar até a duas toneladas. Através deles, era possível que fossem desenvolvidas barras que admitiam diâmetros que variavam de 6,3 a 12,5 mm, sendo responsável pelo consumo de cerca de 80% da quantidade geral de barras aplicadas no Brasil desde a sua idealização.

Para que se admita o uso de vergalhões soldáveis, as empresas buscaram tecnologias estrangeiras, chegando então na concepção do vergalhão CA-50 S, caracterizado por um sistema de resfriamento controlado através do revenimento, gerando uma maior resistência mecânica e admitindo um núcleo com ductibilidade elevada. O processo de soldagem entre armaduras longitudinais e transversais normalmente aplicado é o MIG, podendo ser tanto robotizado, manual ou com caldeamento por resistência elétrica (Goecks, 2011).

O uso das soldas nos elementos de aço de construção CA, apresenta vantagens e desvantagens. Suas vantagens são:

- Maior produtividade da mão-de-obra;
- Custos menores dos insumos de soldagem em relação ao custo do arame recozido;
- não necessidade de soldagem de 100% dos pontos de interseção. Em alguns casos basta soldar cerca de 50% a 70% dos pontos;
- Maior rigidez das peças e, portanto, maior facilidade de manuseio;
- Melhor controle dos espaçamentos dos estribos;
- Racionalização do canteiro de obras; Maior rapidez na execução da obra.

As desvantagens são:

- Baixa densidade de carga no transporte;
- Necessidade, em algumas obras, de equipamentos adequados, guias, guinchos etc., para descarregamento e/ou içamento das armaduras;

- Necessidade de planejamento da soldagem em: armaduras ou barras de determinadas armaduras, de pontos de cruzamento, pontos de interseção de barras, em razão de dificuldades operacionais durante a montagem final na forma, não devem ser soldadas.

Esses dados são demonstrados com o uso de aço de construção desenvolvido especialmente para ser soldável, e não o aço CA comum (Batista, 2017).

Segundo (ALONSO, 2006), o aço CA-50 possui boa soldabilidade quando analisada a junção longitudinal entre elementos de mesma bitola, como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Barra nervurada de aço CA-50 soldada.



FONTE: (ALONSO, 2006).

Sob a análise de duas amostras (A e B), os elementos foram submetidos ao ensaio de tração terem rompido na solda, os limites de resistência a tração são elevados se comparados com o valor estabelecido de 550 MPa. Portanto todos os resultados obtidos são considerados satisfatórios.

3.5 Projeto de Estruturas de Concreto Segundo a NBR 6118

Os projetos de estruturas de concreto simples, armado e protendido, devem atender aos requisitos da NBR 6118:2014 (ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

3.5.1 Segurança nas Estruturas

Na engenharia estrutural, uma estrutura é considerada segura quando atende os seguintes requisitos: Vida útil, condições normais de utilização e utilização indevida. Um profissional competente deve, portanto, projetar estruturas resistentes, funcionais e duráveis, a custos acessíveis, e atribuir à manutenção uma importância compatível àquela dedicada ao projeto e à execução. (CLÍMACO, 2016).

Nos dimensionamentos das estruturas de concreto é utilizados os estados, podendo ser aplicada a estrutura como um todo ou a elementos isolados. Clímaco (2016), apresenta o seguinte conceito:

“Estados que definem a impropriedade do uso da estrutura, por razões de segurança, funcionalidade ou estética, com desempenho fora dos padrões especificados para sua utilização normal ou interrupção de funcionamento, por ruína de um ou mais de seus componentes.”

Os estados podem ser divididos em dois tipos: Estado-limite de serviço e Estado-limite de último. O estado-limite último (ELU) está relacionado ao colapso ou a qualquer outra forma de ruína, que determina a impossibilidade de utilização da estrutura. Já o estado-limite de serviço (ELS) é relacionado a durabilidade da estrutura, ao conforto e a boa utilização do usuário. No caso ainda das ELS, ela é decomposta em: Formação de fissuras, abertura de fissuras, deformações excessivas, descompressão, vibrações e casos especiais (CARVALHO, 2016).

3.5.2 Elementos lineares submetidos a flexão simples (pura)

As análises estruturais são responsáveis por analisar as ações que ocorrem nas estruturas, identificando desde esforços normais até torções e deslocamentos, buscando modos de analisar o estado limite (BASTOS, 2019).

Essas análises devem ocorrer de modo a permitir que a resposta da estrutura e dos materiais estruturais seja identificado, considerando todos os esforços apresentados e observados.

Há a presença de análises mais refinadas, como no caso de comportamentos semi-rígidos de ligações, devendo assim considerar respostas aproximadas conforme outras solicitações que se mostrem satisfatórias. Essas análises podem ser tanto com relação aos materiais (por meio das análises globais plástica e elástica), quanto aos efeitos dos deslocamentos (sejam eles internos ou

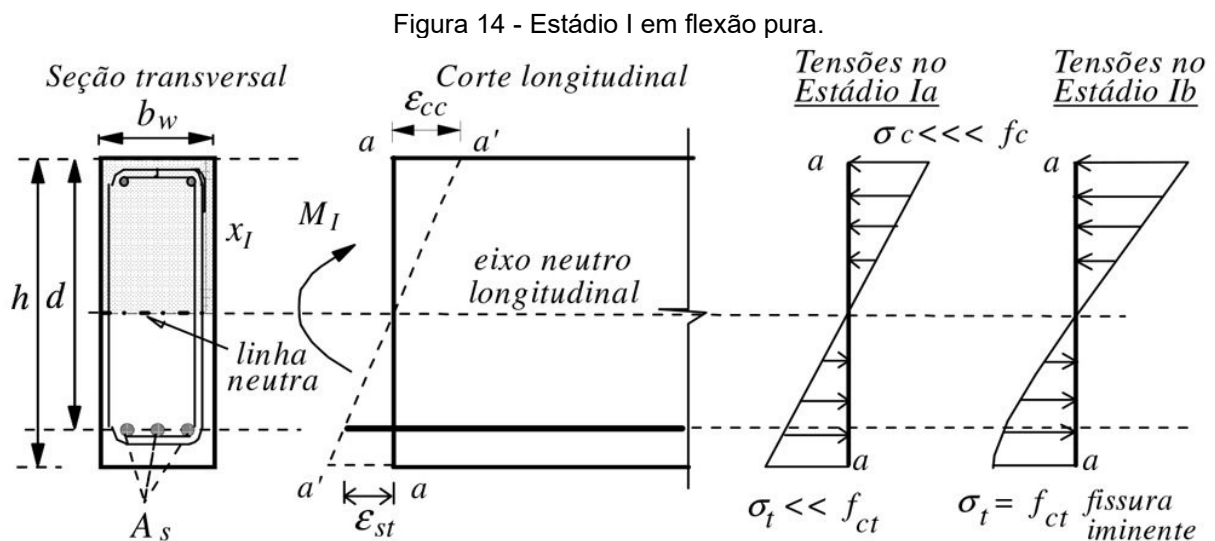
externos que gerem análises lineares e não-lineares), permitindo que as estruturas sejam classificadas de acordo com a sua deslocabilidade (GOECKS, 2011).

3.5.3 Estádios típicos da flexão pura

Em elementos submetidos a ensaios – tipo Stuttgart – permitem identificar três fases bem definidas de comportamento nos trechos sob flexão pura, denominados como *estádios* (CLÍMACO, 2016).

3.5.3.1 Estádio I – peça não fissurada

É considerada a fase inicial do ensaio. A tensão máxima é inferior a resistência do concreto. A peça não apresenta fissuras. A Figura 14, apresenta o esquema da seção transversal e longitudinal. (CLÍMACO, 2016).

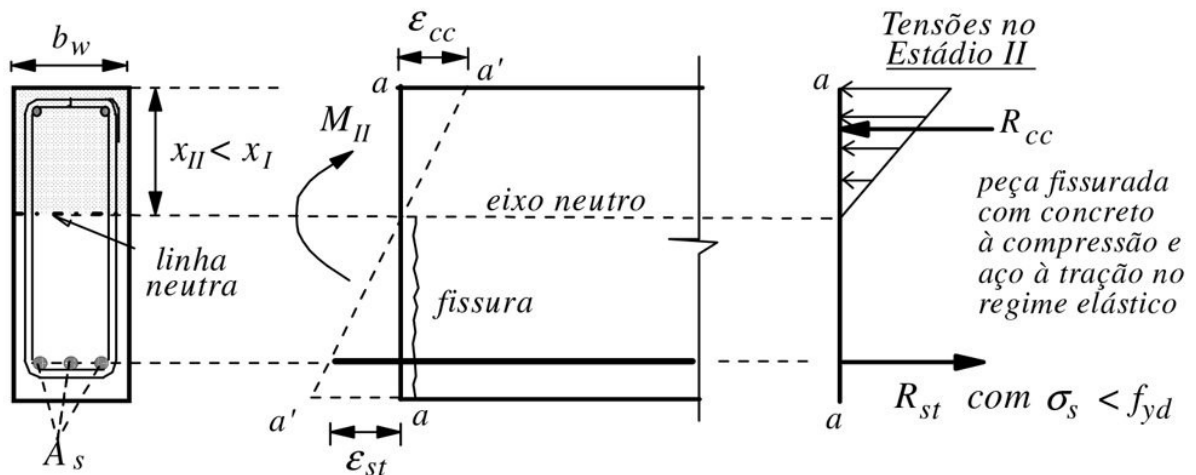


FONTE: (CLÍMACO, 2016)

3.5.3.2 Estádio II – Peça Fissurada

Quando o elemento em ensaio esgota a resistência do concreto a tração e a armadura passa a ser o único elemento a absorver as tensões solicitadas. O aço e a seção comprimida do concreto ainda estão na fase elástica (prevista na ELS). O modelo é apresentado na Figura 15 (CLÍMACO, 2016).

Figura 15 - Estádio II em flexão pura.

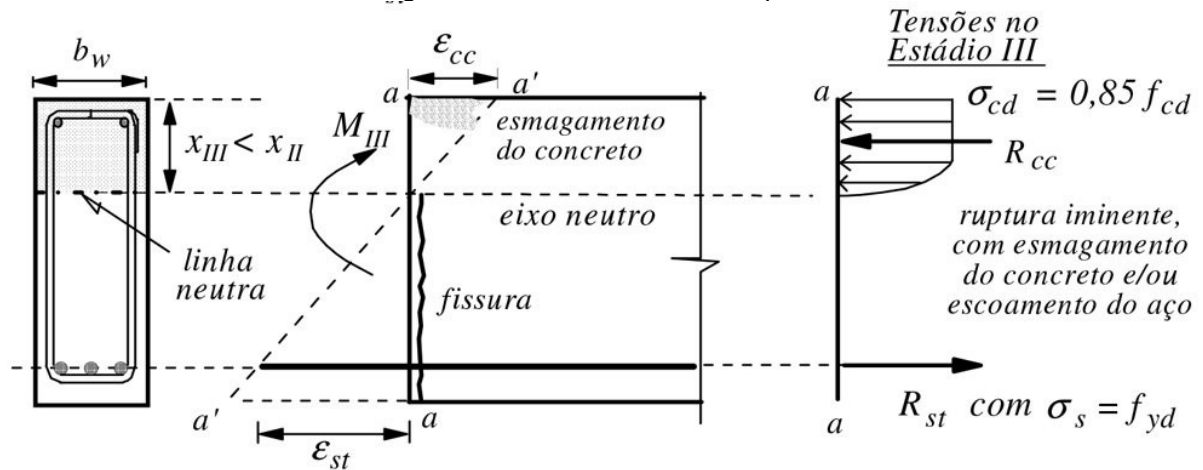


FONTE: (CLÍMACO, 2016)

3.5.3.3 Estádio III – peça iminente a ruptura

O elemento submetido a esse estágio já encontra o ELU, onde há o esmagamento do concreto e o escoamento do aço a tração. A Figura 16, demonstra as tensões solicitadas.

Figura 16 - Estádio III em flexão pura.



FONTE: (CLÍMACO, 2016)

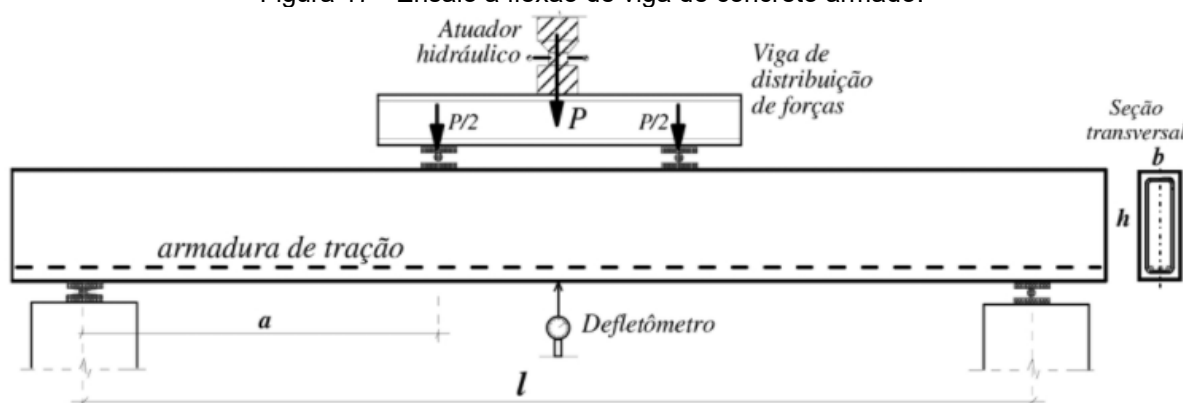
3.5.3.4 Determinação da Resistência à flexão

A determinação de resistência a flexão ocorre através de ensaio mecânico que é utilizado como avaliação para determinação de propriedades como a resistência à flexão, módulo de elasticidade, deformação sob flexão e outras propriedades, que são fundamentais para controlar a qualidade do material e avaliar o desempenho plástico os materiais, quando são submetidos a uma carga de flexão (NIKU, 2001). A carga de flexão refere-se a um esforço físico incorrido de

deformação de modo perpendicular a eixo do corpo, paralelo à força que atua sobre ele.

Os cálculos para determinar a resistência à flexão de um corpo baseiam-se impreterivelmente na seção retangular do corpo de prova, sendo um valor aproximado encontrado quando há variações de espessura/diâmetro ao longo da peça analisada, ocorrendo por meio do uso de um flexímetro ou defletômetro, dotado de um relógio indicador que aplica força sob o ponto de análise, analisando o momento de rompimento para determinar essas propriedades, a Figura 17 demonstra a um modelo do esquema de ensaio. Além disso, demandam um processo de preparação prévia, através de resfriamento e reservado material antes da análise (BASTOS, 2019).

Figura 17 - Ensaio à flexão de viga de concreto armado.



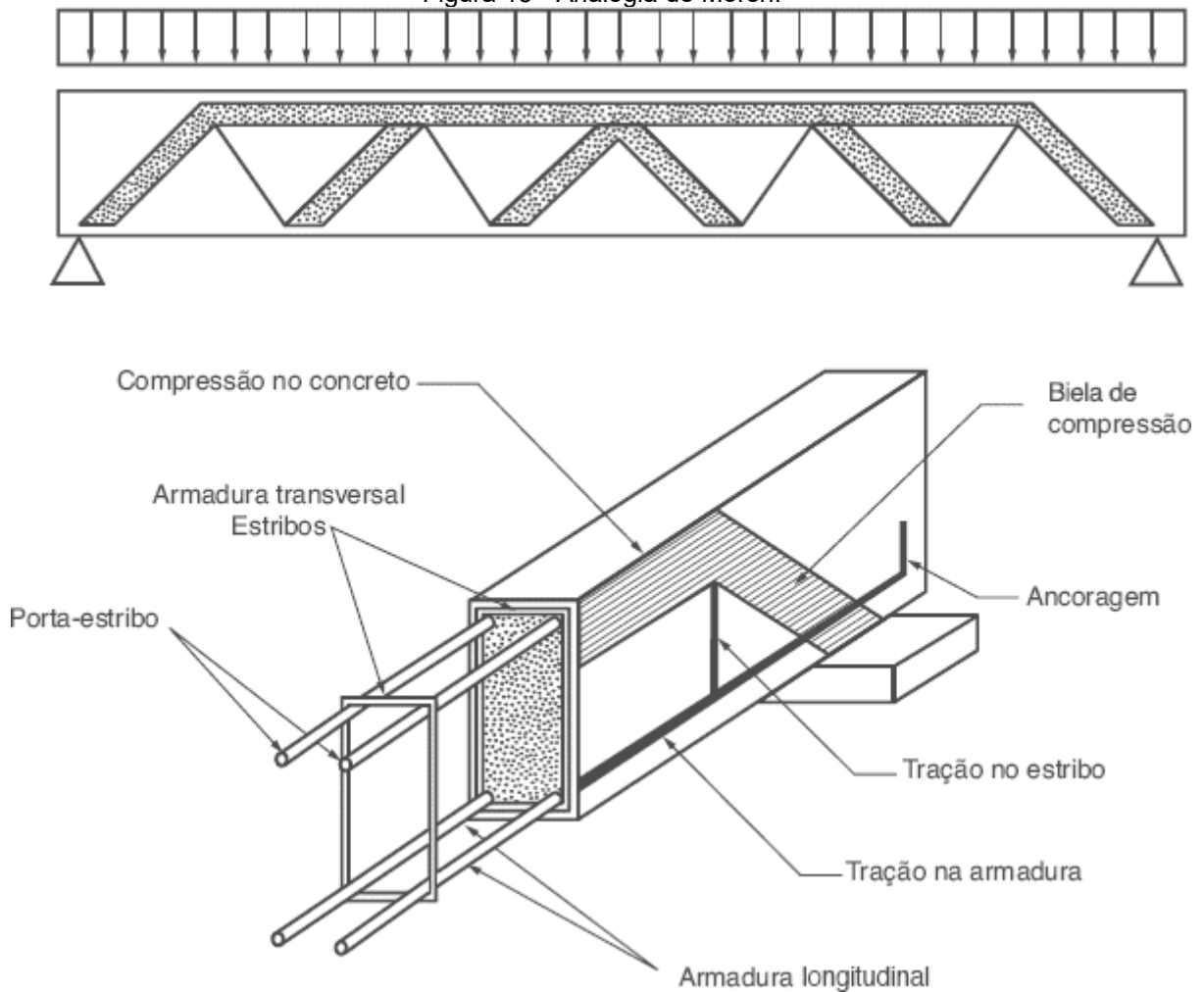
Fonte: (CLÍMACO, 2016)

3.5.4 Componentes da Armação de Vigas de Concreto

O modelo imaginado, conhecido como treliça clássica de Morsch, sofreu poucas modificações e continua válido até hoje como base para entender o dimensionamento das vigas de concreto armado com atuação de força cortante, sendo considerado o melhor dentre os modelos estáticos para explicar o comportamento das vigas de concreto armado (PILOTTO NETO, 2018).

Na analogia de Morsch, a barra horizontal superior corresponde ao concreto acima da linha neutra, que resiste bem ao esforço de compressão. A armadura colocada na face inferior da viga faz o papel da barra horizontal tracionada. Os estribos funcionam como as diagonais tracionadas e as bielas de compressão do concreto representam as diagonais comprimidas da treliça (PILOTTO NETO, 2018).

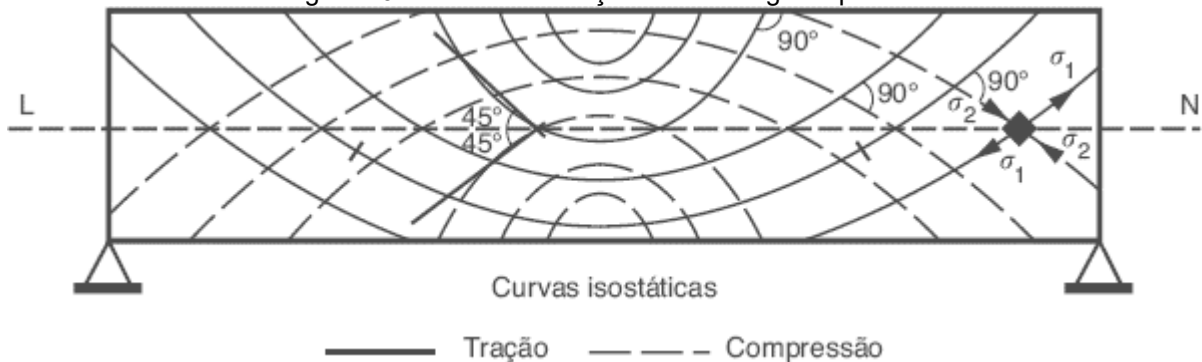
Figura 18 - Analogia de Morsh.



Fonte: (PILOTTO NETO, 2018)

Um ensaio realizado mais tarde em uma viga reta de concreto armado de seção constante, sujeita a um momento de flexão, permitiu que fossem traçadas linhas de tensão no interior da viga. A partir daí constatou-se que os esforços normais de tração e compressão formam as linhas de tensão, conforme é visto na Figura 19 (PILOTTO NETO, 2018).

Figura 19 -Linhas de esforços em uma viga biapoiada.



Fonte: (PILOTTO NETO, 2018)

Pode-se concluir que, para uma viga de concreto armado se manter em equilíbrio, é necessário que as deformações no aço e no concreto se equilibrem.

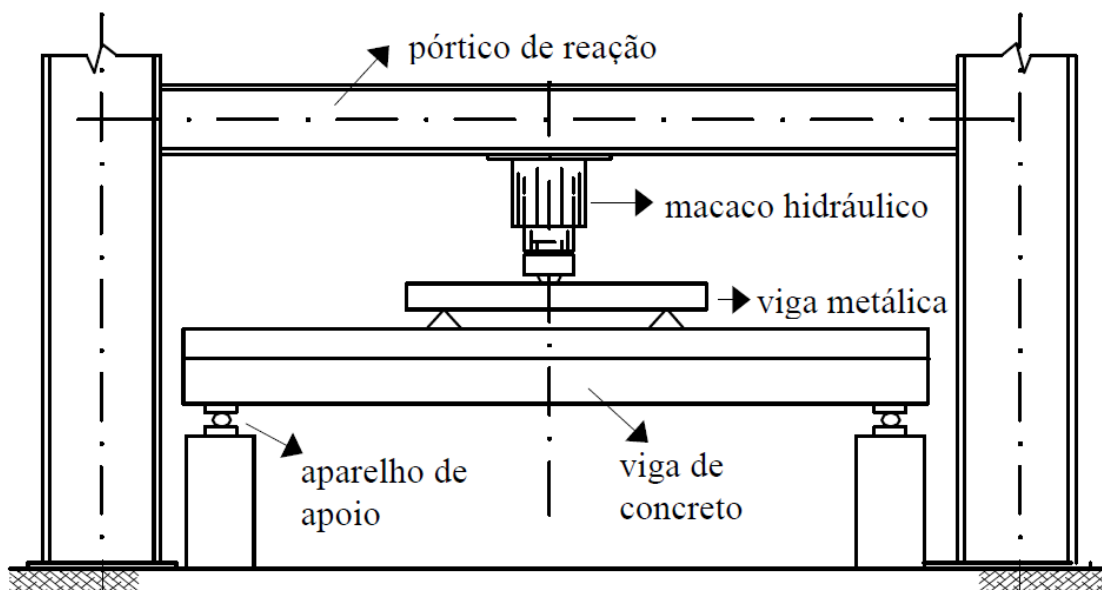
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Programa experimental

O estudo experimental consiste no ensaio de flexão simples de vigas de concreto armado, realizado em uma máquina universal de ensaios mecânicos com capacidade de apoio de vigas.

Através desse dispositivo aplicou-se a força sobre um perfil metálico bi apoiado em cima da mesa da viga. O carregamento da viga, composto pelas reações do perfil metálico, consiste em duas forças concentradas, de mesmo valor, distantes entre si, conforme ilustra a Figura 8. É importante ressaltar que as deformações e deslocamentos na peça, gerados pelo carregamento devido ao peso próprio da viga, foram descontados durante a leitura dos instrumentos de medição instalados.

Figura 20 - Esquema do ensaio.



FONTE:(Reis, 1998)

Para evitar o aparecimento de reações horizontais, utilizaram-se apoios móveis garantindo o esquema estático idealizado de viga bi apoiada. Levando em conta o modelo acima, apresento o sistema real na Figura 21.

Figura 21 - Apresentação do sistema real de aplicação de força.



FONTE: Próprio autor.

Os dados de força aplicada pela prensa e a flecha ocasionada pelo comportamento do elemento de viga serão monitorados. Esses dados irão demonstrar o comportamento do corpo de prova.

Para originarmos a comparação dos elementos foram criados 2 grupos de vigas, sendo o grupo 1 composto por vigas de concreto armado com ligação entre os elementos da armadura por arame recozido, considerados como elementos de referência como metodologia convencional e para o grupo dois com ligação entres os elementos da armadura por solda realizada por eletrodo revestido. A Tabela 4, a seguir, apresenta a distribuição das 10 vigas em 2 grupos. Serão sempre ensaios de pelo menos dois elementos iguais como forma de contraprova.

Tabela 4 - Especificações das vigas do programa experimental.

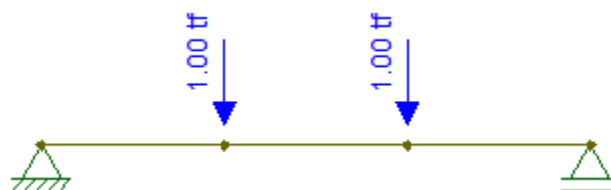
Vigas	Quantidades	Grupos	Especificação do mét. de ligação
V1 e V2	2	Viga de referência	Amarração por arame recozido
V3 a V10	8	Vigas de estudo	Solda

FONTE: Próprio autor.

4.1.1 Detalhamento e Dimensionamento das Vias

O dimensionamento das estruturas de concreto é uma previsão do comportamento dos elementos quando solicitados. Assim iniciou analisando as reações de apoio para um elemento de viga bi apoiada, representando o modelo esquemático para o ensaio, como demonstra a Figura 22. Utilizou-se o procedimento de cálculo apresentado no livro de Carvalho (2016). Após um pré-dimensionamento, determinou-se que a carga para o ensaio foi baseada em um elemento que tenha a armação próxima da usualmente usada nas obras, considerando uma armação longitudinal de 8,0 mm. A sua geometria inicial será de: 12 cm de largura, 20 cm de altura e um comprimento total de 150 cm. Assim, o elemento deverá resistir, uma carga central de 2.000 kgf ou 2,0 tf, atendendo ao ELS e de aproximadamente 5.000 kgf ou 5,0 tf no ELU. Como procedimento de ensaio considera que a carga central deve ser dividida em terços do elemento, serão então duas cargas de 1.000,0 kgf ou 1,0 tf.

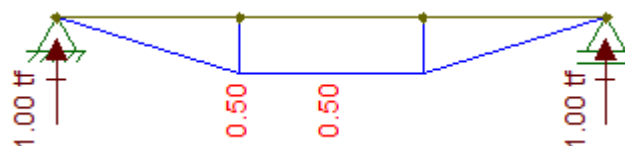
Figura 22 - Modelo plano do ensaio.



FONTE: Próprio autor, retirado do Ftools(2021).

Analisou-se as reações de apoio e os esforços solicitantes internos (Figura 23) e apresentou-se os seguintes resultados: Reações de apoio iguais a R_1 e $R_2 = 1,00 \text{ tf}$ e o Momento fletor máximo igual a $M_{k \text{ máx.}} = 0,50 \text{ tf.m} = 4,90 \text{ kN.m}$.

Figura 23 - Diagrama de momentos fletores e reações de apoio.



FONTE: Próprio autor, retirado do Ftools (2021).

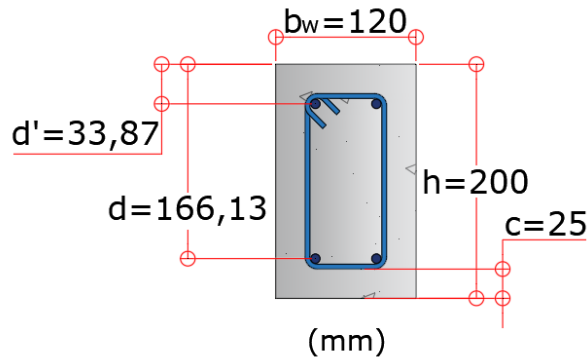
Os parâmetros geométricos definidos são:

- $d \rightarrow 166,13 \text{ mm}$ ou $16,613 \text{ cm}$
- $d' \rightarrow 33,87 \text{ mm}$ ou $3,387 \text{ cm}$
- M_{sd} ou $M_d \rightarrow$

- $b_w \rightarrow 12 \text{ cm ou } 0,12 \text{ m}$

E são representados graficamente na Figura 24.

Figura 24 - Representação gráfica dos elementos geométricos da seção transversal da viga.



FONTE: Próprio autor.

Sendo que: d representa a altura útil, d' a distância entre o centro de gravidade da armadura longitudinal comprimida e a face mais próxima do elemento; b_w é a largura transversal de vigas de seção retangular; h é a altura total do elemento e c é o cobrimento de concreto.

A partir dos dados, iniciou-se o dimensionamento das armaduras longitudinais. Para um concreto de $f_{ck} = 20 \text{ MPa} = 20.000 \text{ kN}$, e a partir do coeficiente de minoração do concreto a compressão, determinou-se que o f_{cd} :

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{20.000}{1,4} = 14.285,71 \text{ kN} \quad (4.1)$$

O momento solicitante de cálculo M_d (momento ponderado) deverá ser ponderado levando em conta a segurança dos estados limites de serviço.

$$M_d = \gamma_f \cdot M_k = 1,4 \cdot 4,90 = 6,86 \text{ kN.m} \quad (4.2)$$

Como forma de determinado o domínio que os elementos atuarão, é necessário a determinação na linha neutra (x). Aplicando a equação (4.3), temos:

$$x = \frac{0,68 \cdot 0,166 \pm \sqrt{(0,68 \cdot 0,16613)^2 - 4 \cdot 0,272 \cdot \left(\frac{6,86}{0,12 \cdot 14.285,71}\right)}}{0,544} = \begin{cases} 0,376 \text{ m} \\ 0,039 \text{ m} \end{cases} \quad (4.3)$$

Para a primeira solução, o valor de $x_1 = 0,376 \text{ m}$, maior que a altura total da viga, indica que a linha neutra passa fora da seção transversal, não atendendo ao caso de flexão simples; assim, o valor correto é $x = 0,039 \text{ m}$.

Para a verificação do domínio, com relação a linha neutra, pode-se considerar que:

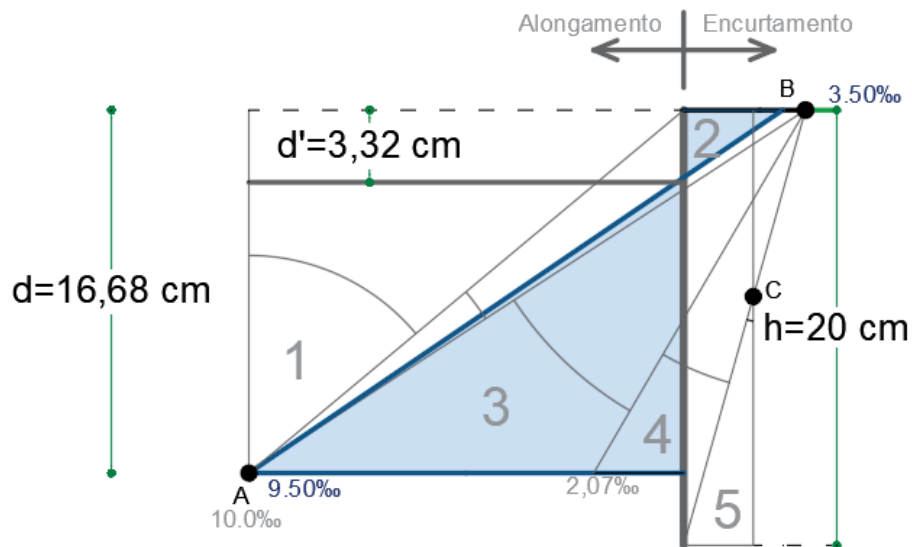
$$z = 0,259 \cdot d = 0,259 \cdot 0,166 = 0,043 \text{ m} \quad (4.4)$$

Na relação de x :

$$0,043 \text{ m} > x = 0,039 \rightarrow \text{domínio 2} \quad (4.5)$$

Apresenta-se então graficamente o comportamento no domínio 2 (Figura 25):

Figura 25 - Domínios de estado-limite último de uma seção transversal para a viga em estudo.



FONTE: Próprio autor.

É necessário definir o braço de alavanca (z):

$$z = d - 0,4 \cdot x = 0,16613 - 0,4 \cdot 0,039 = 0,151 \text{ m} \quad (4.6)$$

Por fim, pode-se definir a área de aço (A_s):

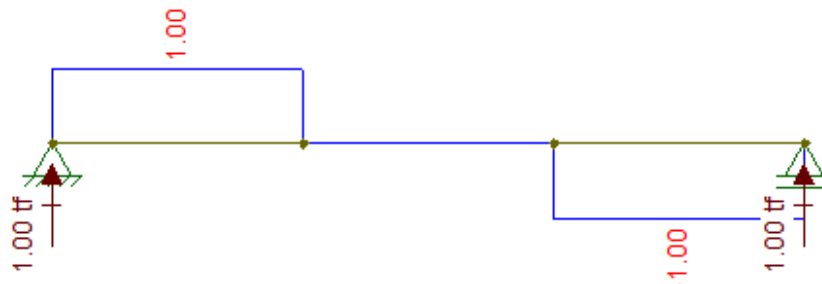
$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_{yd}} = \frac{6,86}{0,151 \cdot 43,478} = 1,0 \text{ cm}^2 \quad (4.7)$$

Sabendo-se que a área de uma barra de $\varnothing 8,0 \text{ mm} = 0,503 \text{ cm}^2$, serão necessários o uso de 2 barras na armadura principal (inferior), totalizando a área de aço de $1,006 \text{ cm}^2$. Posteriormente, seguiu-se para o dimensionamento e detalhamento das armaduras transversais (estribos)

Para o dimensionamento dos estribos, será utilizado o modelo de cálculo I da NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), adotando-se ângulo de inclinação das bielas de compressão de 45 graus e ângulo de inclinação dos estribos de 90 graus.

Para o detalhamento dos estribos é necessário conhecer os esforços cortantes na viga. Determinou-se esse valor, a parti da carga aplica e em análise aos esforços cortantes, como demonstra a Figura 26.

Figura 26 - Diagrama de esforços cortantes.



FONTE: Próprio autor.

Considerou-se os resultados apresentados pelo diagrama de forças cortantes, e determinou-se que os valores de solicitantes máximos (força cortante solicitante máxima), $V_{sk} = 1,00 \text{ tf} = 9,8066 \text{ kN}$. Sabendo que o coeficiente de majoração para o concreto (γ_f) é de 1,4, pode-se determinar a força solicitante de cálculo (V_{sd}):

$$V_{sd} = \gamma_f \cdot V_{sk} = 1,4 \cdot 9,8066 = 13,729 \text{ kN} \quad (4.8)$$

Para determinar o valor da força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína da biela ($VRd2$). Para concreto $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$:

$$VRd2 = 0,35 \cdot b_w \cdot d = 0,35 \cdot 12 \cdot 16,613 = 69,775 \text{ kN} \quad (4.9)$$

Para a verificação do esmagamento das bielas comprimidas devemos atender a seguinte equação:

$$V_{sd} \leq VRd2 \leftrightarrow 13,729 < 69,755 \rightarrow \text{Atende!} \quad (4.10)$$

Assim, pode-se calcular a força de sollicitação mínima ($V_{sd\text{ mín.}}$), que para concreto $f_{ck} = 20\text{ MPa}$:

$$V_{sd\text{ mín.}} = 0,101 \cdot b_w \cdot d = 0,101 \cdot 12 \cdot 16,613 = 20,135\text{ kN} \quad (4.11)$$

Como esses resultados analisou-se a qual situação o dimensionamento se enquadra, onde:

$$\begin{cases} \text{Se } V_{sd} \leq V_{sd\text{ mín.}} \rightarrow \text{utiliza - se armadura transversal mínima;} \\ \text{Se } V_{sd} > V_{sd\text{ mín.}} \rightarrow \text{calcula - se a armadura transversão para } V_{sd} \end{cases} \quad (4.12)$$

No caso estudado:

$$V_{sd} \leq V_{sd\text{ mín.}} \leftrightarrow 13,729 \leq 20,135 \rightarrow \text{utilizar armadura mínima} \quad (4.13)$$

Determinou-se a armadura mínima com o uso da equação abaixo, para concreto $f_{ck} = 20\text{ MPa}$ e aço CA-50:

$$A_{sw\text{ mín.}} = \rho_{sw\text{ mín.}} \cdot b_w = 0,0884 \cdot 12 = 0,884\text{ cm}^2/\text{m} \quad (4.14)$$

Deve-se atender aos seguintes requisitos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Diâm. mín. e máx.} \rightarrow 5\text{ mm} \leq \phi t \leq \frac{b_w}{10} \\ \text{Espaçamento Longt. mín. e máx.} \begin{cases} V_{sd} \leq 0,67 \cdot V_{Rd2} \rightarrow S_{máx.} = 0,6d \leq 300\text{ mm} \\ V_{sd} > 0,67 \cdot V_{Rd2} \rightarrow S_{máx.} = 0,2d \leq 200\text{ mm} \end{cases} \end{array} \right.$$

Admitiu-se o diâmetro de 5,0 mm e espaçamento de 15 cm.

O detalhamento e a posição das armaduras são apresentados nas Figura 9 e Figura 10.

Figura 27 - Detalhamento da seção longitudinal da viga.

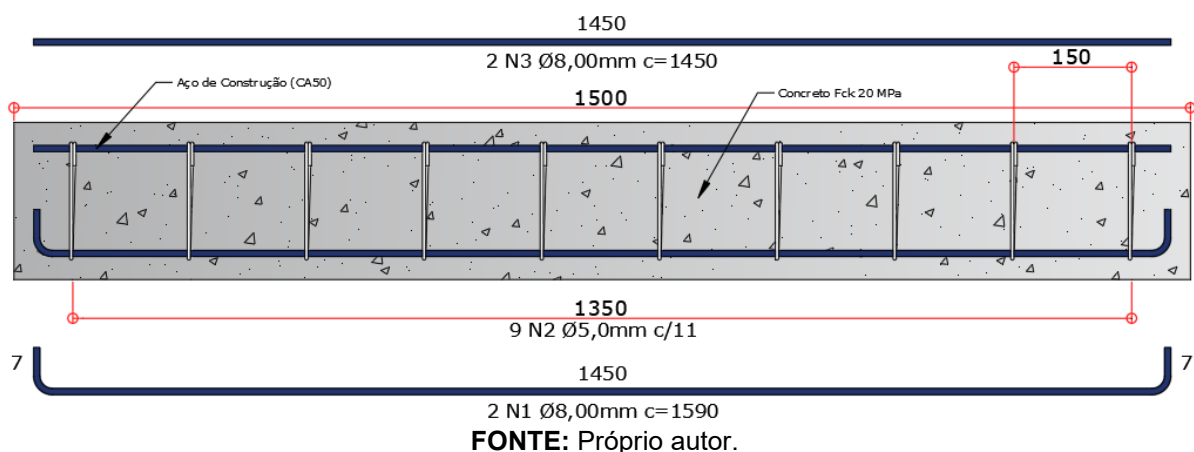
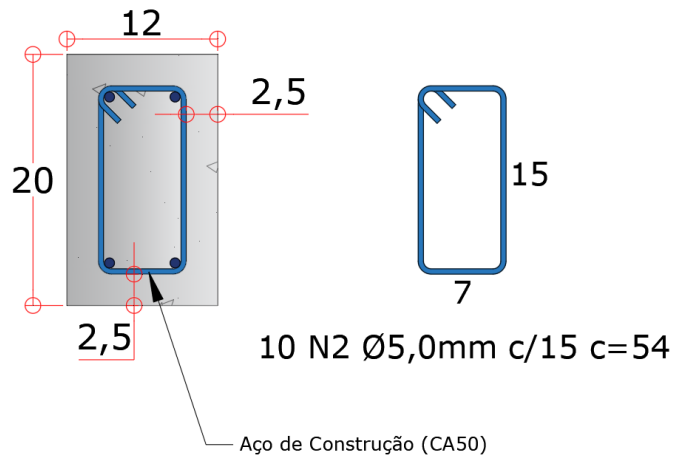


Figura 28 - Detalhamento da seção transversal da Viga



FONTE: Próprio autor.

As figuras – Apresentação da armadura montada das vigas. Figura 29 e Figura 30 apresentam a construção das armações a partir do modelo acima.

Figura 29– Apresentação da armadura montada das vigas.



FONTE: Próprio autor.

Figura 30 - Apresentação da dobra do estribo utilizado no estudo.



FONTE: Próprio autor.

Os diâmetros de dobras seguem a NBR 6118:2014, onde ela estabelece que para os aços CA – 50 das armadura longitudinais (Tabela 9.1, do item 9.4.2.3 da norma), com barras de diâmetro menores que 20mm, os pinos de dobra devem possuir $5 \cdot \varnothing$, assumindo então a medida de 40mm. Para os aços CA – 60 das armaduras transversais, também denominadas estribos (Tabela 9.2, do item 9.4.6.1 na norma), o pino deve ter $3 \cdot \varnothing_t$, resultando num diâmetro de 25,2mm (ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

A tabela a seguir representa a quantidade e o tipos de aço utilizados.

Tabela 5- Quantidade, tipos e cortes de Aço por viga

Nº	AÇO	Qtde	Bitola (mm)	Corte (m)	Total (m)	Peso (kg)
N1	CA50	2,00	8,00	1,56	3,18	1,256
N2	CA50	2,00	8,00	1,45	2,90	1,146
N3	CA50	10,00	5,0	0,54	5,40	0,832

FONTE: Próprio autor.

4.1.2 Execução das amarrações

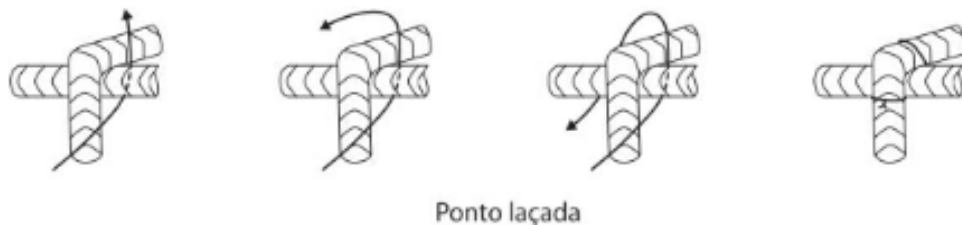
A pré-montagem da armadura une as barras longitudinais e os estribos por pontos de ligação executados com arame recozido tipo BWG¹nº 18. O arame recozido é produzido com aço de baixo teor de carbono, muito maleáveis e fácil de usar.

¹ Birmingham Wire Gauge.

A montagem das armaduras do grupo 1 foi realizada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 14.931:2004 (ABNT, 2014). Para a montagem utilizou-se arame recozido com fio duplo retorcido, mantendo os espaçamentos entre estribos e entre as barras conforme o detalhamento da viga. Cada viga terá 9 estribos distribuídos conforme espaçamento apresentado na Figura 2.

O método de amarração escolhido foi o ponto laçada, que é utilizado para amarração de estribos, como demonstra a Figura 12.

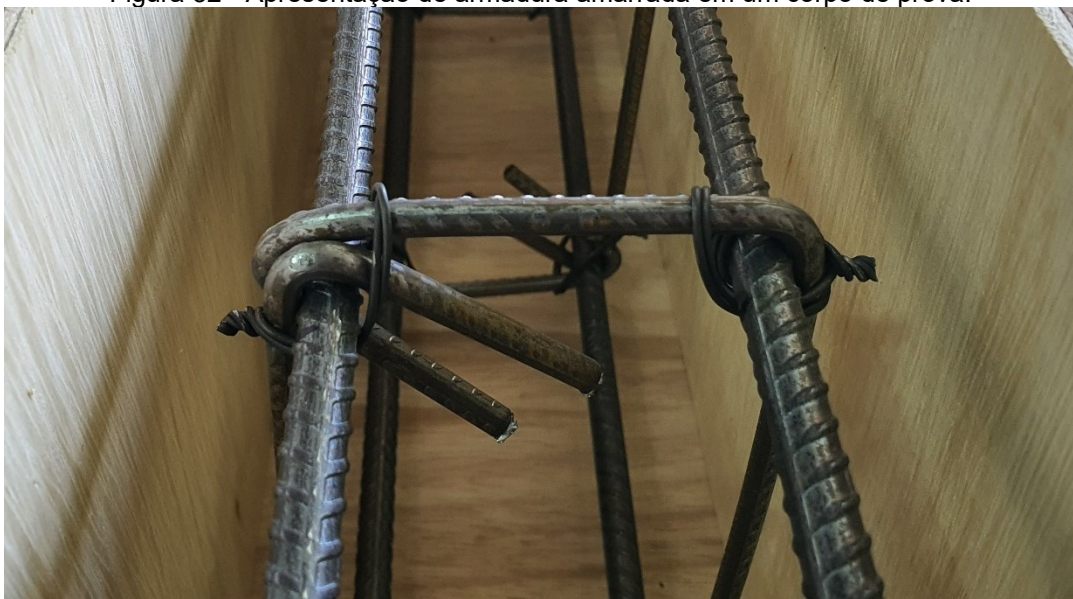
Figura 31 - Método de amarra por arame recozido.



FONTE: (SENAI, 2015).

Para a aplicação dos pontos de amarração, utilizou-se a ferramenta torquês de armador. Por fim, colocou-se uma etiqueta presa por um fio de nylon, para que a armadura possa ser identificada mesmo após a concretagem. A Figura 32 apresenta o resultado das amarrações por arame recozido nos corpos de prova para o estudo.

Figura 32 - Apresentação de armadura amarrada em um corpo de prova.



FONTE: Próprio autor.

A seguir iniciou a montagem dos corpos de prova soldados.

4.1.3 Execução das Soldas

O procedimento de montagem do grupo 2 foi realizada com soldagem a arco elétrico manual de eletrodo revestido do tipo E6013 de 2,5 mm, mantendo os espaçamentos do detalhamento. Todos os pontos de contato entre os estribos e as armaduras longitudinais, foram fixadas com pontos de soldas.

Figura 33 - Apresentação da ligação por solda em uma armação do corpo de prova.



FONTE: Próprio autor.

Utilizou-se uma inversora de solda da marca Boxer e modelo Touch 150BV, uma máquina de uso não profissional, onde os critérios da pesquisa em que é considerado o uso de um equipamento simples e básico, mais comum nas obras de pequeno porte. A regulagem do equipamento foi considerada o que indica o manual para a bitola do eletrodo e a voltagem de alimentação da solda. Assim, por estar alimentada em uma rede 127v, a amperagem selecionada na máquina foi de 90 ± 10 A.

Verificou-se visualmente o preenchimento e a penetração da solda. Analisou-se também a incidência de poros ou excessos respingos por configuração irregular da amperagem e/ou da velocidade da soldagem. Não foi constatado nenhum problema.

Após este procedimento, colocou-se uma etiqueta presa por um fio de nylon, para que a armadura possa ser identificada mesmo após a concretagem.

4.1.4 Traço de Concreto

A dosagem do traço utilizada na pesquisa foi baseada na resistência característica apontada anteriormente. Como método foi utilizada o Método de Caldas Branco para F_{ck} , como resistência de 20 Mpa, onde o traço é definido pelo proporcionamento de 1:2,5:3,5, representado a proporção de cimento, areia e brita. O fator água/cimento está em torno de 0,83.

Empregou-se o cimento Portland composto do tipo CP II E-32. Foi considerado uma taxa de perda de 10% na formulação da quantidade total necessária de concreto. O volume de concreto é demonstrado da Tabela 4.

Tabela 6 - Volume de Concreto necessário.

Descrição	(cm)			V (m ³)	Qtde	Taxa de Perda	Vol. Unitário (m ³)	Volume Total (m ³)
	H	L	C					
Volume de Concreto	20	12	100	0,0200	10	10%	0,036	0,360

FONTE: Próprio autor.

As proporções e quantidade de cada material para a moldagem de um corpo de prova são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Quantitativos dos materiais da dosagem.

Material	Quantidade Uma Viga		Quantidade Total	
Cimento	0,010	m ³	0,100	m ³
	11,68	Kg	116,8	Kg
Areia*	0,026	m ³	0,260	m ³
	44,57	Kg	445,7	Kg
Brita	0,029	m ³	0,290	m ³
	40,14	Kg	401,4	Kg
Água	8,24	l	8,24	l

*Considerando uma umidade de 10%

FONTE: Próprio autor.

Mediu-se o abatimento no troco-cone, também conhecido como *slump test* do concreto logo após a concretagem, onde o valor ficou entre 11 cm. O dado foi utilizado para determinar qual será a classe de consistência, para assim determinar qual será o método de adensamento, conforme NBR 5738. (TÉCNICAS, 2015)

Toda dosagem dos concretos das vigas foi submetida a prova em ensaio de compressão. Foram necessárias as dosagens de 2 betoneiras, pois foi limitado ao volume máximo do equipamento. Para cada produção do concreto foram retirados 4 corpos de prova para o rompimento de em período de 7, 14, 21 e 28 dias. Todas as dosagens apresentaram a resistência esperada.

4.1.5 Execução dos Corpos de Prova

Foram utilizadas formas de madeirite naval, para garantia uma boa geometria, bom acabamento das superfícies e maior controle da absorção da água. Foi aplicado nas paredes das formas um desmoldante específico para concreto, garantindo um bom desempenho nesse processo.

Após a montagem das armaduras, serão colocados os espaçadores plásticos ao longo da viga, com o intuito de garantir o correto posicionamento e cobertura das armaduras. A classe de agressividade adotada foi a Classe I (fraca), que especifica um revestimento mínimo de 25 mm, conforme a NBR 6118:2014. Com os espaçadores colocados corretamente, as vigas foram posicionadas dentro de formas de madeirite e preparadas para a concretagem. Será usado concreto com f_{ck} de 20 Mpa em todos os grupos de elementos.

Com o posicionamento correto das armaduras nas formas, o último passo é a concretagem. O concreto foi lançado manualmente com o auxílio de colheres e pás, e foi utilizado um vibrador de imersão do tipo agulha de com diâmetro de 20mm, garantindo um bom adensamento do concreto em todo o elemento, e ainda diminuindo o índice de vazios da peça. Houve o controle do posicionamento do vibrador na hora da imersão, para que ele fique na vertical, com o limite de inclinação de até 45°. Evitou-se o contato do vibrador com o aço e a forma para a formação de uma película de argamassa.

Após o preenchimento total da forma, inclusive com o adensamento total do concreto, fez-se o arrasamento da superfície, garantindo a geometria do elemento. Finalizada a concretagem, os elementos serão armazenados em local abrigado de sol e calor, garantido uma boa cura do concreto. As apresentam as montagens, moldagem e os processos de adensamento do concreto.

Figura 34 - Formas de madeirite naval dos corpos de prova.



FONTE: Próprio autor.

Figura 35 - Armadura posicionada nas formas.



FONTE: Próprio autor.

Figura 36 - Adensamento do concreto dos corpos de prova.



FONTE: Próprio autor.

Figura 37 - Apresentação dos corpos de prova moldados.



FONTE: Próprio autor.

O processo total de endurecimento e cura do concreto é de 28 dias, onde o ele atingirá a resistência próximo da final, sendo que é o tempo considerado por norma.

4.1.6 Ensaio de Flexão Simples

Utilizou-se a máquina de Emic DL30000N com a célula de carga Trd 29, e programa Tesc versão 3.05, com os apoios e rotula central, realizou-se o rompimento dos 6 corpos de prova para a determinação da resistência a flexão simples do conjunto. Utilizou-se os apoios rolantes para que não haja nenhuma interferência e/ou restrição além das verticais.

Figura 38 - Máquina de Ensaio com corpo de prova posicionado.



FONTE: Próprio autor.

Os corpos foram submetidos a força que gerou uma flexão simples nos elementos e como ponto de determinação do final do experimento, considerou-se

um deslocamento máximo de 35 mm, aferidos pelo deslocamento do pistão do equipamento, sendo esperado que todos os elementos já perderiam suporte a carga. Acompanhou-se o desempenho dos elementos nos 3 estádios de típicos de elementos submetidos em flexão pura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados Obtidos

Durante o processo de montagem das amarrações, um dos objetivos do trabalho é a comparação relativa à execução. Para o processo de amarração, com o uso de ferramentas simples, como o alicate torques, o processo é simples, porém trabalhoso, repetitivo e desgastante. A curva de aprendizagem é rápida. Após poucas peças montadas o processo vai se aperfeiçoando naturalmente. É um procedimento moroso, lento e dependendo da posição ou altura em que o a armação é apoiada, método não é ergonômico para quem o faz. A necessidade de você ter que preparar o arame, deixando-o “duplo”, embora encontre no mercado dessa forma, deve ser levado em conta na hora da preparação desse material. As dobras e o manuseio dos arames causam desconforto nos dedos, que devem ser expostos para maior sensibilidade. O uso de luvas como EPI é fundamental, porém quase impraticável, pois os tipos de luvas mais comum, como feitas de trama de lã ou qualquer outro tecido, quem além de diminuir a sensibilidade dos dedos, enroscam em toda ponta de sobra do arame que é cortado na hora finalizar a amarração. O uso de luvas de raspa (couro) é descartado visto que a sensibilidade é quase inexistente.

Quando se utiliza de soldas para o processo de fixação e posicionamento dos elementos da armação, evitamos algumas dificuldades da amarração. Não é necessário posicionar o estribo sobre o vergalhão longitudinal, além de posicionar o arame que irá amarrar os elementos, além do esforço e habilidade com o alicate torques para trava, girar e amarrar os elementos. No processo de soldagem somente posicionamos o estribo e o vergalhão de apoio e tocamos com eletrodo, e instantaneamente a fusão dos elementos acontece. Além de deixar a ligação mais rígida, sem folga e restringindo qualquer movimentação, o processo é bem mais simples e rápido, dependendo de em alguns casos, não sendo necessário soldar todos os pontos. Com a rigidez da ligação, mesmo com somente alguns pontos, o elemento fica firme, mantando os elementos na posição correta. O uso dos EPIs, desde que de qualidade, não atrapalham o processo.

Um dos cuidados ao se soldar as ligações é o controle simples da amperagem, que por qualquer descuido ou falta de habilidade do operador, é muito

fácil ter uma penetração tão grande da solda sobre o elemento, chegando a romper o elemento mais fino, no caso os estribos. Deve-se tomar cuidado com a limpeza antes e depois da soldagem. Por serem elementos circulares e posicionados um sobre o outro, se as peças estiverem com as dobras em desigualdade, em alguns casos, nem chegando próximo na ligação, o processo pode gerar um desalinhamento, como demonstra a Figura 39. Pela rigidez da ligação, a movimentação e aproximação fica quase impraticável. Mas o processo é bem mais eficiente, mesmo tomando os cuidados simples de qualquer soldagem e a sua curva de aprendizagem é semelhante ao processo anterior.

Figura 39 - Desalinhamento das ligações soldadas.



Fonte: Próprio autor.

O tempo médio gasto para a montagem nas duas metodologias é apresentado na Tabela 8. Levando em conta que os elementos foram montados pelo autor e que a experiência nos processos era pequena em ambos os modos.

Tabela 8 - Tempo dos processos.

Vigas	V1A	V2A	V3S	V4S	V5S	V6S	V7S	V8S	V9S	V10S
Tipo	Amarrada		Soldada							
Tempo (min)	21	18	10	10	8	7	7	8	6	7

Média (min)	19 min. e 30 seg.	7 min. e 54 seg.
--------------------	-------------------	------------------

Fonte: Próprio autor.

Analisando os resultados acima, podemos comprovar que a execução das ligações soldadas é quase 60% mais rápida que a amarrada.

Considerando o banco de dados para produtividade, a atividade de armação geral de aço CA-50 por amarração com arame, dispõe de uma produção de 12,50 kg/h para uma equipe de 1 ferreiro e 1 ajudante (MATTOS, 2010).

Segundo a SINAPI², para a região de São Paulo no mês de março de 2022, o valor da composição de custo para Armador com encargos complementares (cód. 88245) é de R\$ 24,03/h. Já para o para ajudante de armador com encargos complementares (cód. 88238) é de R\$ 20,95 por hora trabalhada.

A partir desses dados apresentamos:

Tabela 9 - Comparação de custo e produtividade

Tipo	Valor da hora trabalhada			Tempo Médio de Produção	Custo de MO por Viga	kg/viga	Produtividade
	Ferreiro	Ajudante	Equipe				
Amarrada	R\$ 24,03	R\$ 20,95	R\$ 44,98	19'30"	R\$ 14,62	3,234 kg	9,95 kg/h
Soldada	R\$ 24,03	R\$ 20,95	R\$ 44,98	7'54"	R\$ 5,92	3,234 kg	24,56 kg/h
					R\$ 8,70		14,61 kg/h
					59,49%		146,85%

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 9, apresentou também a diferença de quase 60% nos custos de mão-de-obra e aumento de 146% na produtividade.

Um das formas de se quantificar e avaliar os casos executivos, criou-se 8 quesitos avaliativos, apresentados na Tabela 10, com as respectivas notas para ambos os casos avaliados. Vale ressaltar que as notas representam: 1 – ruim, 2 – médio e 3 – bom.

Tabela 10 - Quesitos avaliativos da execução.

Quesitos	Amarrada	Soldada
Facilidade do processo	1	3
Qualidade de acabamento	2	3
Rigidez	1	3
Velocidade de execução	1	3
Acesso a equipamentos e ferramentas	3	2

² Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil.

Influência do Uso de EPIs	1	3
Mão-de-obra qualificada	3	2
Desperdício de material	3	1
Total	15	20

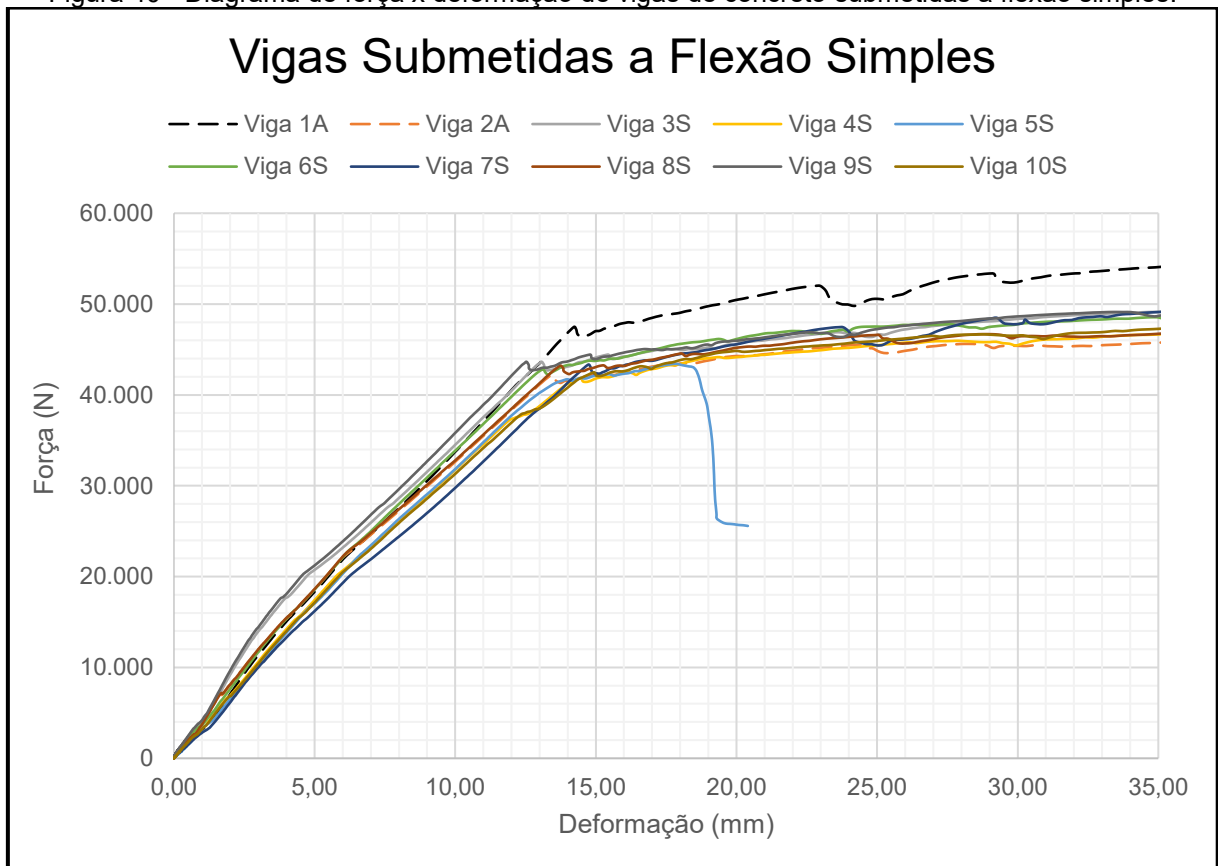
Fonte: Próprio autor.

Os processos de montagem das formas e a moldagem não foram afetados pela diferença as ligações das armaduras. Após 30 dias das moldagens dos corpos de prova prosseguiu-se para os ensaios mecânicos, levando em conta que o processo de cura dos elementos atingiu um estado competente para os ensaios.

Para avaliar o comportamento mecânico dos elementos estruturais de vigas de concreto armado submetidos a flexão simples (pura) foram feitos ensaios em dez vigas de 2 grupos.

Como resultado principal, é apresentado a Figura 40, que apresenta o diagrama força x deformação das vigas ensaiadas. Para identificar os grupos as vigas seguindo da numeração com "A", são as vigas que tiveram suas armações amarradas e as seguidas da numeração em "S", são vigas que tiveram de suas armações soldadas.

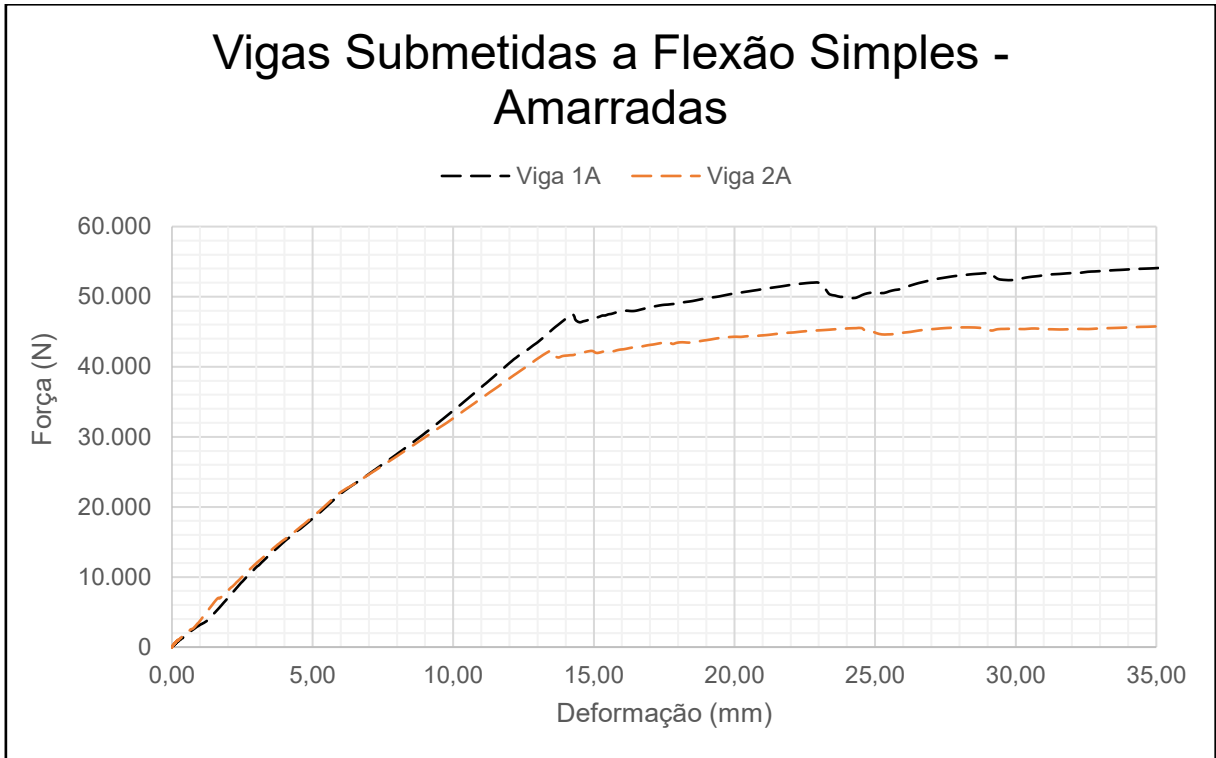
Figura 40 - Diagrama de força x deformação de vigas de concreto submetidas a flexão simples.



Fonte: Próprio autor.

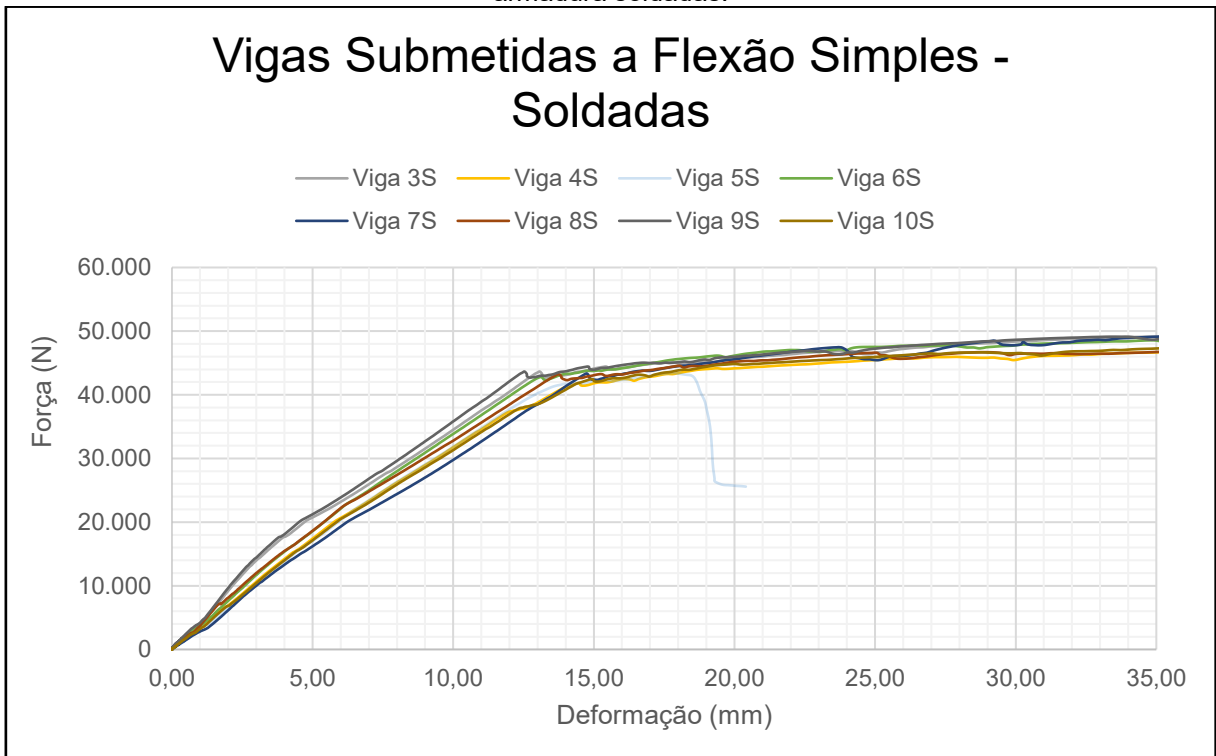
A seguir é apresentado os gráficos de cada grupo, nas figuras Figura 41 e Figura 42.

Figura 41 - Diagrama de força x deformação de vigas de concreto submetidas a flexão simples com armadura amarrada.



Fonte: Próprio autor.

Figura 42 - Diagrama de força x deformação de vigas de concreto submetidas a flexão simples com armadura soldadas.



Fonte: Próprio autor.

De maneira geral, as vigas, independentemente do tipo de solução para fixação do posicionamento da armadura, apresentaram um comportamento semelhante até uma força de 44 kN e deformação de 13,0 a 15,0 mm. Isso determinando que nesse período a inclinação da reta é semelhante entre os elementos e conseqüentemente seu módulo de elasticidade. Nesse intervalo as vigas estão trabalhando no regime elástico. Assim, a partir desse regime que se obteve algumas diferenças identificadas entre o comportamento dos elementos.

Os elementos tiveram comportamentos semelhantes em relação aos estádios típicos de elementos submetidos a flexão. O regime de estágio I se encerrou, momento em que os elementos iniciaram o aparecimento das primeiras fissuras na face inferior (tracionada) no instante que a força atingiu 26 a 29 kN, dando início ao estágio II. Os elementos mantiveram o estágio II até o primeiro aparecimento de compressão, onde houve o esmagamento do concreto na face superior, dando início ao estágio III, como demonstra a Figura 43. A transição ocorreu no instante que a força atingiu de 43 a 46 kN.

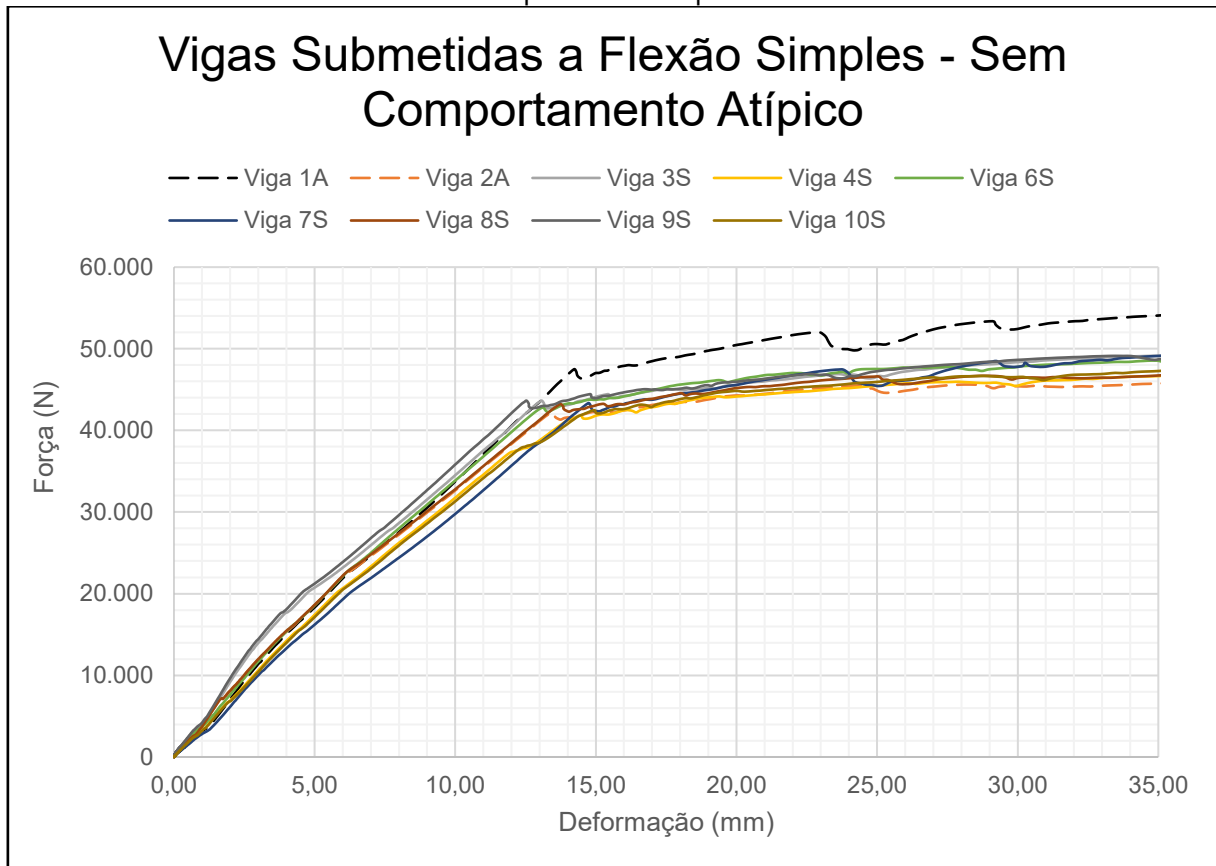
Figura 43 - Viga com surgimento de esmagamento do concreto - Estádio III.



Fonte: Próprio autor.

Algumas vigas apresentam um comportamento bem semelhante até mesmo após a primeira perda de suporte, ao final do regime elástico, e são apresentadas na Figura 44.

Figura 44 - Diagrama de força x deformação de vigas de concreto submetidas a flexão simples – sem comportamento atípico.



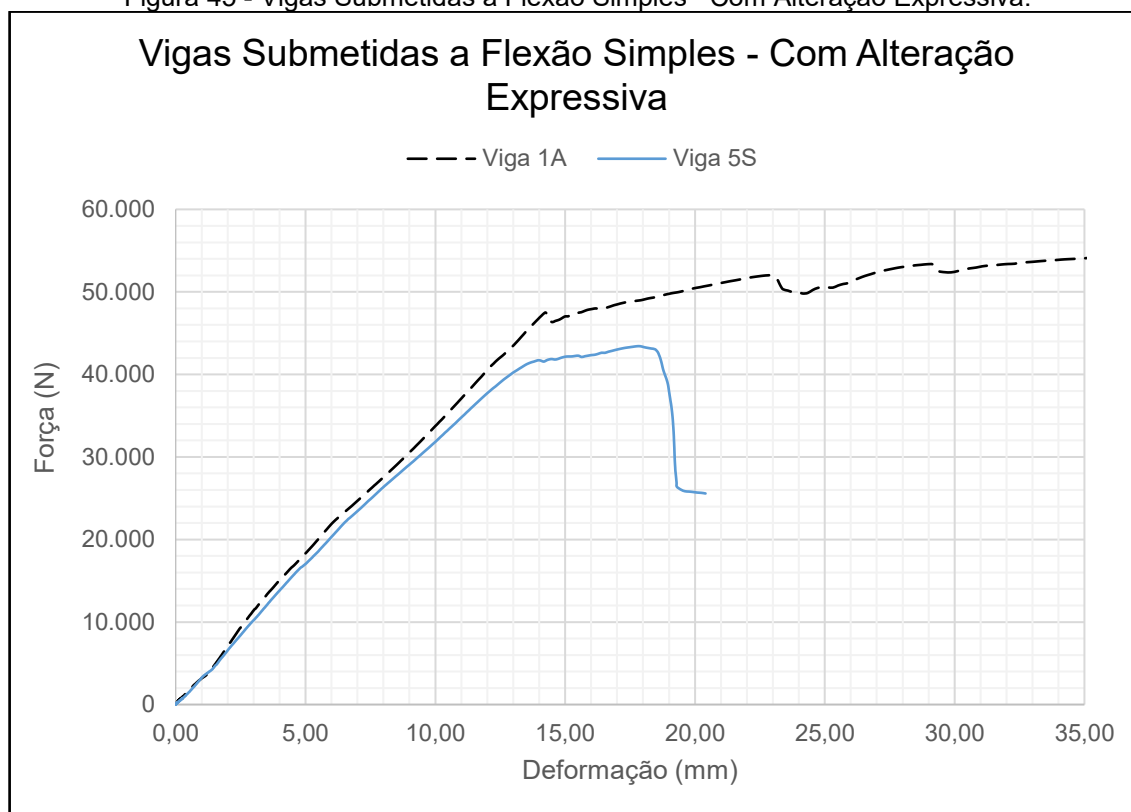
Fonte: Próprio autor.

As 9 vigas apresentadas na Figura 44 demonstraram uma variação de comportamento sobre o esforço solicitado quase como desprezíveis, e conseqüentemente, demonstraram que não houve diferença no desempenho entre as vigas amarradas (grupo 1, de referência) com as vigas soldadas (grupo 2). Os ensaios apresentaram as resistências esperadas sobre os elementos, onde atuaram até o ELU³, satisfazendo a segurança considerada nos cálculos.

Em contrapartida, uma das vigas armadas (VA1) teve um comportamento relevante, demonstrando uma resistência imediatamente superior as demais, distinguindo para um ponto de atenção no ensaio. Um dos elementos soldados (V5S) obteve uma ruptura precoce também marcando o elemento demandando de uma análise aprofundada. Essas disparidades foram reunidas e apresentadas na Figura 45.

³ Estado Limite de Utilização.

Figura 45 - Vigas Submetidas a Flexão Simples –Com Alteração Expressiva.



Fonte: Próprio autor.

A seguir buscou-se apresentar as possíveis causas dos elementos apresentados. Os resultados para a Viga armada de número 1 (V1A) apresentaram que a viga teve um desempenho sobre a força melhor que as outras vigas. Em geral um suporte de 5 kN a mais que os outros ensaios, com 3 pontos de perda de suporte bem caracterizados, um a uma deformação de 14 mm, onde houve a transição do regime elástico para o plástico, posteriormente em 23 mm e por fim em 28 mm, visto que o ensaio foi finalizado quando a deformação atingiu 35mm. Analisando visualmente o elemento após o ensaio, não foi verificado nenhum comportamento diferente do esperado (Figura 46).

Figura 46 - Ensaio da Viga V1A.



Fonte: Próprio autor.

O suporte superior deste ensaio pode ser concebido por vários fatores, como: o posicionamento dos elementos da armação dentro da viga; o adensamento do concreto durante a moldagem; a qualidade do aço; alguma alteração no apoio no equipamento do ensaio. Todos esses fatores não podem ser constatados visualmente e mesmo posterior ao ensaio, com a inspeção sobre o corpo de prova, que teve sua armação exposta, não foi constada nenhuma irregularidade ou defeito (Figura 47). Para efeito de comparação deve-se considerar uma média para o grupo um, que são das duas vigas amarradas.

Figura 47 - Inspeção da viga amarrada (V1A).



Fonte: Próprio autor.

Em análise para a viga soldada 5 (V5S), o comportamento foi bem relevante ao estudo. Considerando o comportamento ao ensaio de flexão, como demonstra o gráfico da Figura 45 o elemento apresenta regime elástico até uma deformação de 14 mm e uma carga de 41,5 kN, posteriormente houve uma variação da inclinação dessa reta, mas ainda atuando em regime elástico. Chegando a 43,8 kN houve uma perda de carga expressiva, perdendo o suporte a carga em até 26,0 kN (uma diferença de 17,8 kN) e por fim se rompendo (Figura 48), caracterizando um comportamento diferente entre as vigas.

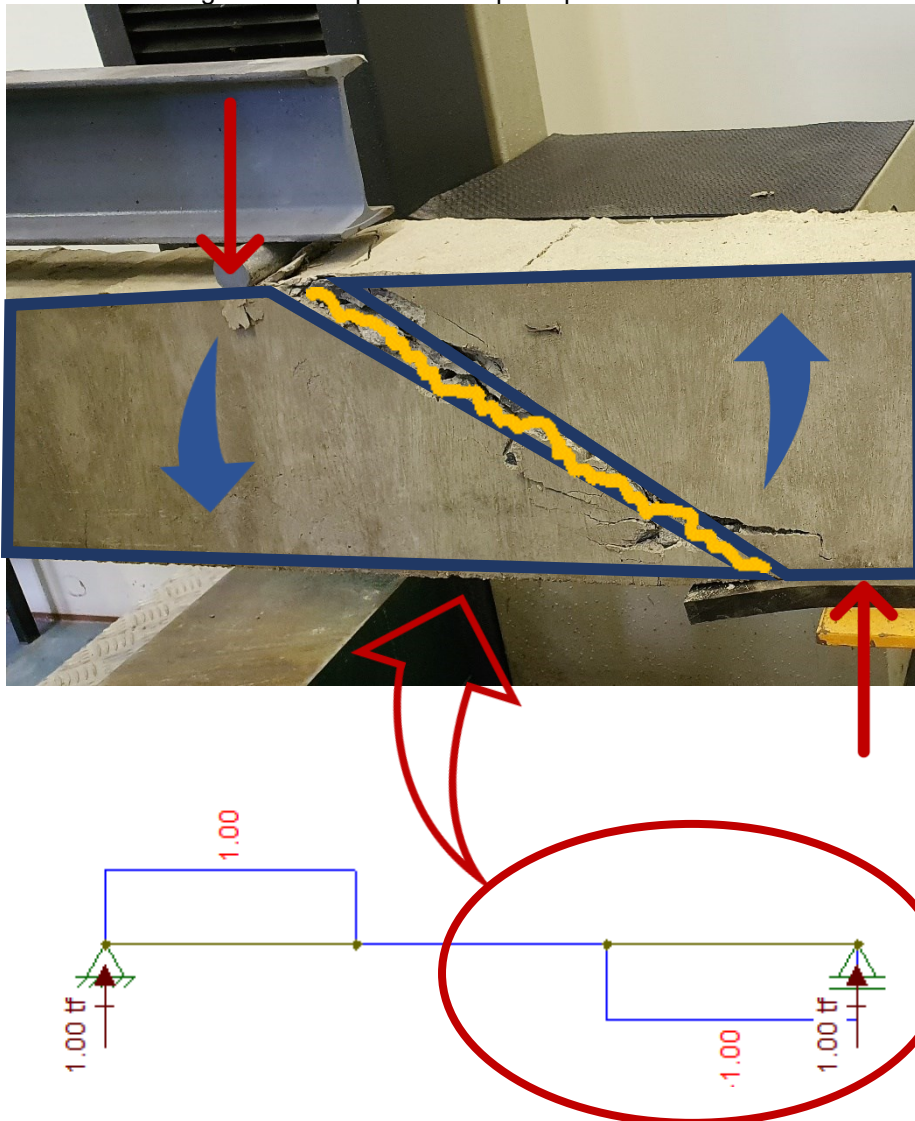
Figura 48 - Ruptura do corpo de prova 5 (V5S).



Fonte: Próprio autor.

É possível visualizar que a resistência à tração do concreto foi atingida, pois houve um deslocamento, criando a linha de fragilidade inclinada, ligando os pontos de aplicação da carga e o poio, por consequência de força de cisalhamento gerada, onde ainda os estribos e as barras longitudinais deformaram. Esquemáticamente o modelo é apresentado na Figura 49.

Figura 49 - Esquema da ruptura por cisalhamento.



Fonte: Próprio autor.

Esse tipo de ruptura pode ter ocorrido de modo que os elementos solicitados ao cisalhamento das armações, no caso os estribos, não resistiram ao esforço gerado pelas cargas, ocasionando o colapso. Na inspeção foi confirmado que os estribos não foram rompidos (Figura 50) o que descartaria o mal dimensionamento dos elementos, eliminando a primeira hipótese.

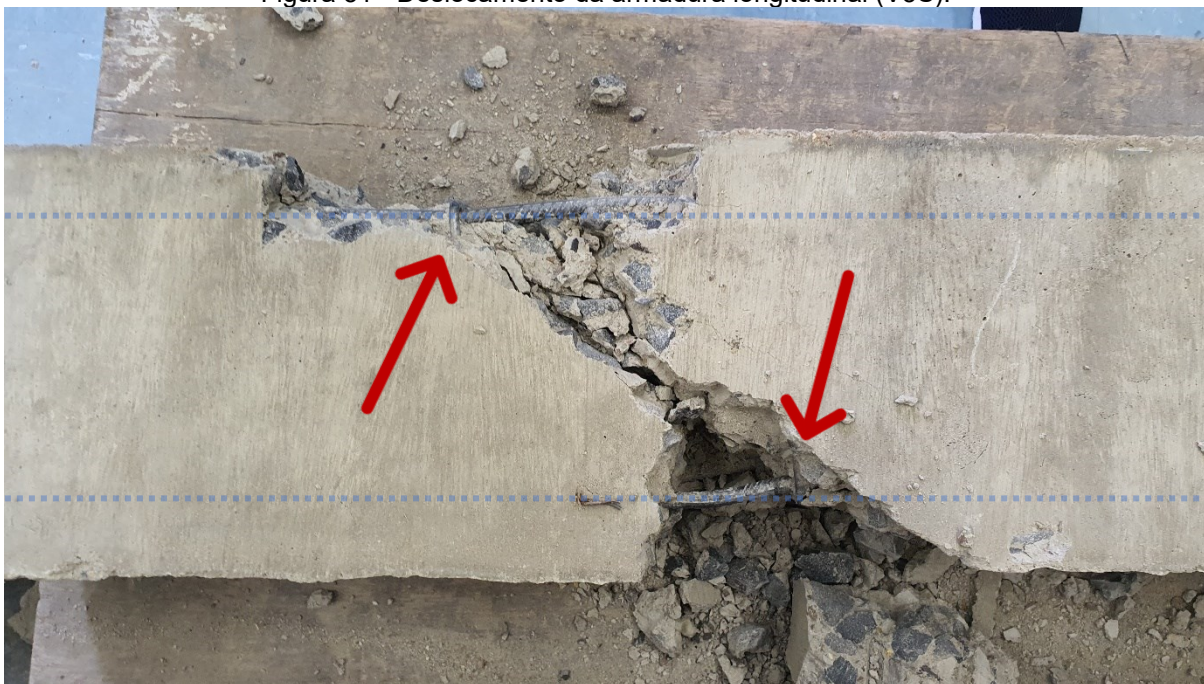
Figura 50 - Verificação dos estribos da Viga V5S.



Fonte: Próprio autor.

Assim, foi constatado um descolamento excessivo na armadura longitudinal, no posicionamento dos estribos, precisamente nos pontos de soldas dos elementos, também visíveis na Figura 50, desse corpo de prova. A Figura 51 e Figura 52, em vista lateral a viga, apresenta melhor esse deslocamento.

Figura 51 - Deslocamento da armadura longitudinal (V5S).



Fonte: Próprio autor.

O ponto onde houve a ligação dos elementos por solda deve ter fragilizado a ligação e conseqüentemente o vergalhão longitudinal, o que favoreceu ao deslocamento cisalhante na viga, entre dois estribos (Figura 52). Ainda observado a Figura 52, foi constatado que não houve nenhum deslocamento no eixo da vista superior (eixo horizontal, no sentido perpendicular).

Figura 52 - Possíveis pontos fragilizados pela soldagem.



Fonte: Próprio autor.

Visualmente, no ponto da solda, não foi constatado uma diminuição da secção, ocasionada por uma má execução da solda, tornando um ponto propício para enfraquecer a viga (Figura 53).

Figura 53 - Detalhe no ponto de solda.



Fonte: Próprio autor.

A partir das informações coletadas, é possível avaliar os resultados.

5.2 Discussões dos Resultados

Ao analisar o desenvolvimento das montagens de ambos os modos, cada caso apresenta suas características positivas e negativas. Quando montada a ferragem com arames, as ferramentas são mais simples, mas o procedimento é mais complexo. O procedimento de dobra, transpasse e enlaçar é muito desgastante para o operador, isso quando não ergonômico, quando não é possível utilizar uma bancada. O uso de EPI, equipamento essenciais para a proteção, não favorecem o desenvolvimento de um trabalho rápido e eficaz, contudo são fáceis de encontrar e possuem baixo preço, tornando um processo barato e simples, sem necessidade de mão de obra específica, porém exige experiência. Embora a ligação por amarração seja a forma mais utilizada no Brasil, ficou evidente a necessidade de buscar alternativas melhores e de fácil acesso.

Como forma de tornar a execução mais eficiente, buscou por meio do processo com o uso das soldas para a fixação dos elementos de armação. Os

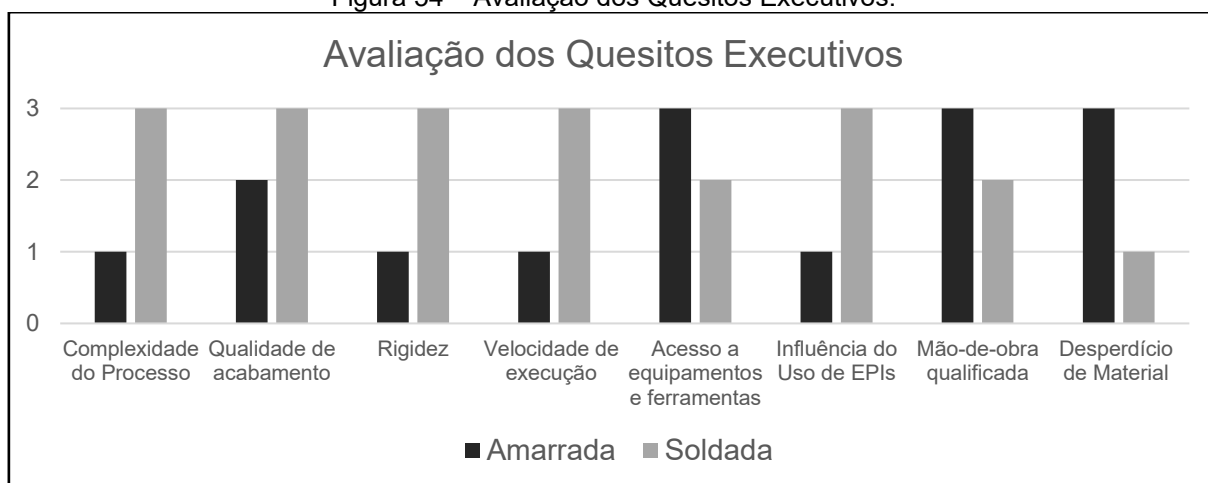
equipamentos são mais caros e específicos, considerados de fácil acesso, porém é necessária a ligação com a rede elétrica. A execução dessa atividade para a fixação é rápida e bem menos trabalhosa que a convencional. Os cuidados durante a execução são fundamentais para uma solda segura e de qualidade, sendo um dos pontos, a necessidade de mão-de-obra específicas e equipamentos de qualidade. Os EPIs não desfavorecem a eficiência das atividades, o uso de equipamentos de qualidade e tecnologia é fundamental, que preservam pela segurança, visto que os riscos são maiores e eminentes. Ou uso de máscara com escurecimento automática está diretamente ligada ao bom desempenho do processo.

Além desses parâmetros, quantificou-se o tempo necessário nos processos (Tabela 8) e constatou-se que o processo de fixação por soldagem é mais rápido. Em média o processo de amarração ficou em 19 minutos e 30 segundos e por soldagem 7 minutos e 54 segundos.

Com relação aos custos e a produtividade, as diferenças são bem relevantes como demonstra a Tabela 9. Para o serviço de armação, gerou uma economia de 60% nos custos de mão-de-obra e uma produtividade superior em 146%. Então, a utilização de solda demonstrou mais econômica e eficiente.

Então, a partir dos quesitos apresentados temos a Figura 54.

Figura 54 – Avaliação dos Quesitos Executivos.



Fonte: Próprio autor.

Ficou evidente que os processos que envolve a fixação por soldagem se sobressaem sobre o método convencional quando avaliado sobre os processos executivos.

Após a execução dos ensaios e avaliado o comportamento de cada um dos corpos de prova testados sobre a solicitação imposta e constatou-se que o desempenho foi semelhante entre os dois grupos. Com poucas variações entre de resistência entre a maioria dos casos.

Se sobressaíram 2 corpos de prova. Um, de uma fixação por amarração de arames (V1A), onde apresentou uma resistência um pouco superior das demais, sem a causa comprovada. Essa variante não impacta sobre os resultados do estudo, pois embora o desempenho foi superior, o as inclinações das retas e curva impressa no gráfico de força x deformação são equivalentes. O outro corpo de prova, no caso soldado (V5S), obteve um rompimento prematuro que necessita atenção. Como uma das preocupações do estudo foi a fragilidade da junta soldada, essa foi a primeira hipótese a ser considerada. Buscou-se então inspecionar os pontos de maior deformação que coincidiram com os pontos das soldas, favorecendo ainda mais a hipótese anterior. Como provemos somente de inspeção visual, não foi contatado nenhuma seção inferior à do estribo, ocasionada por alguém erro no processo da soldagem e não foi descoberto nenhuma fissura no local.

A influências da ZTA⁴ poderia ter fragilizado o material na junta, mas por limitações do estudo não foram visualizadas, o que deixa como sugestão para pesquisas futuras, com uma análise local das juntas com o uso de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Embora os dois corpos de prova apresentarem desvios, no caso da viga amarrada (V1A) o desvio não é crítico e representa um comportamento satisfatório, deve ser considerado. O corpo de prova da viga soldada (V5S) que obteve um desvio bem evidente de erro, podem representar como margem existente, sendo então descartado.

Fundamentado com os resultados obtidos com os ensaios de flexão, o comportamento das vigas soldadas atendeu de maneira satisfatória ao desempenho com relação ao ELU, apresentando a priori como seguras e eficientes sobre as solicitações.

Uma circunstância a ser apresentada é que o estudo levou em conta um curto prazo de uso dos elementos estruturais (vigas) e a longo prazo os pontos de solda

⁴ Zona Termicamente afetada.

podem favorecer a agressividade ao aço de construção, facilitando a incidência de corrosão por exemplo. O estudo para esses casos deve ser considerado.

6 CONCLUSÕES

Conforme os resultados obtidos, é possível concluir que a proposta de vigas em concreto armado utilizarem o processo de atrelamento dos elementos de armaduras por soldagem, possuem um comportamento satisfatório ao dimensionamento e atendem as solicitações de flexão simples com segurança quando comparados com o sistema convencional.

O desempenho dos processos de montagem e execução são superiores quando se utiliza soldas, além de uma economia de 60% nos custos com a mão-de-obra o estudo demonstrou um aumento de 146% na produtividade de uma equipe composta por um ferreiro e por um ajudante.

Os corpos de prova soldados obtiveram um comportamento semelhante quando analisados sob os gráficos de força x deformação. Embora obtiveram poucas variações de resistência e deformação, o desempenho é regular e satisfatório comparados com os modelos de controle com armadura amarrada.

De forma geral, durante o ensaio, o regime de estágio I se encerrou, momento em que os elementos iniciaram o aparecimento das primeiras fissuras na face inferior (tracionada) no instante que a força atingiu 26 a 29 kN, dando início ao estágio II. Os elementos mantiveram o estágio II até o primeiro aparecimento de compressão, onde houve o esmagamento do concreto na face superior, dando início ao estágio III. A transição ocorreu no instante que a força atingiu de 43 a 46 kN. Os elementos permaneceram deformando até o limite de 35 mm, sem perder a capacidade de resistir a carga.

As vigas de controle (grupo 1 - amarradas) apresentaram resistência em média de 45kN quando atingem o estágio III. Já as vigas com armação soldada (grupo 2), apresentaram resistências de 44kN atingindo o estágio III. Mesmo que ligeiramente inferior, apresentam desempenho satisfatório.

Com isso, observou-se que somente um corpo de prova (V5S) com armação soldada, obteve um rompimento prematura, com uma força máxima de 44 kN e um perda de suporte a deformação a 19 mm, sendo um possível erro do experimento e não demonstrando um erro da soldagem.

A trinca se manifestou em uma linha transversal ligando os pontos de aplicação de carga e de apoio, dentro da força cisalhante máxima atuando

transversalmente inclinada. Portanto, não foi constatado nenhum problema visual sobre a junta e então o elemento foi descartado como possível erro no ensaio. Vale salientar que o estudo foi a curto prazo e que é evidente estudos das ligações a longo prazo.

Conclui-se, então, que as armações com aço de construção e as soldadas com eletrodo revestido, apresentam um bom desempenho a esse tipo de solicitação a flexão simples e que podem ser empregadas nas construções. O processo deve ser acompanhado para garantir a qualidade da ligação e ressalta-se ainda que as armações soldadas são tão eficientes quanto as amarradas e com custos e rapidez mais positivos.

7 REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8965: Barras de aço CA 42 S com características de soldabilidade destinadas a armaduras para concreto armado.** Rio de Janeiro, p. 4. 1985.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos.** Rio de Janeiro. 1992.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480: Aço Destinado a Armaduras para Estruturas de Concreto Armado - Especificação.** Rio de Janeiro, p. 17. 2007.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregado para Concreto - Especificação.** Rio de Janeiro. 2009.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto - Procedimentos.** Rio de Janeiro, p. 59. 2014.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, p. 256. 2014.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação.** Rio de Janeiro. 2015.

AGUIAR, J. E. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, p. 173. 2006.

ALMEIDA, L. C. D. **Elementos Estruturais.** Notas de Aulas - Unicamp. Campinas, SP, p. 15. 2006.

ALONSO, M. D. B. **Caracterização de União por Solda de Tôpo em Barras CA-50 com Eletrodo Revestido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 67. 2006.

ALTRAN, D. A. **Procedimento numérico para análise de vigas de alvenaria estrutural submetidas à flexão simples.** Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, SP. 2010.

ALVA, G. M. S. **Concepção estrutural de edifícios em concreto armado.** Notas de Aula, Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, p. 24. 2007.

ALVES, R. B.; MATTIODA, R.; RIESEMBERG, R. D. R. C. APLICAÇÃO DOS CONCEITOS DA QUALIDADE NO PROCESSO DE EXECUÇÃO DE ARMADURAS PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO A Engenharia de Produção e o Desenvolvimento Sustentável: Integrando Tecnologia e Gestão.**, Salvador, BA, 06 a 09 de outubro de 2009.

ANEPACC. **Boletim econômico**. Anepac 2015. [S.l.]: [s.n.]. 2015.

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 805. Standard method for penetration resistance of hardened concrete**. Philadelphia. 1985.

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 1240: Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures**. Philadelphia. 2004.

BARRETO, M. F. O. **Caracterização microestrutural de superfícies e interfaces de vergalhões de aço auto-revenidos utilizando microscopia eletrônica de varredura (mev) e análise química**. 21º CBECIMAT. Curitiba: [s.n.]. 13 Nov. 2014. p. 8.

BASTOS, P. S. D. S. **Fundamentos do Concreto Armado**. Notas de Aulas - Unicamp. Bauru, SP. 2019.

BASTOS, P. S. D. S. **DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO À FORÇA CORTANTE**. UNESP. Bauru, SP, p. 79. 2021.

BATISTA, A. Desenvolvimento de vergalhões soldáveis e armaduras soldadas. **Brasil Engenharia**, Piracicaba, v. 579, 2017.

BATTAGIN, A. F. Uma Breve história do cimento Portland. **ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland**, 2009. Disponível em: <<https://abcp.org.br/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>>. Acesso em: 21 junho 2020.

BAUER, L. A.. **Materiais de Construção**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. I, 2019.

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. **Edifícios de Múltiplos andares em aço**. São Paulo, SP: PINI, 2008.

BENTO, R. C. **Análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado: uso da avaliação do ciclo de vida (ACV) no processo decisório do dimensionamento**. Tese de Doutorado (Doutorado em Arquitetura) - USP. São Carlos, SP. 2016.

BOHÓRQUEZ, C. H. N. **Especificação de Procedimento de reparo por soldagem sem tratamento térmico posterior – Efeito de revenimento produzido pelos ciclos térmicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - CPGEM/UFSC. Florianópolis, SC, p. 172. 2001.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 9^a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CARVALHO, R. C. **Cálculo e Detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2014. 4^a. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2016.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2^a. ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, v. II, 1986.

CLÍMACO, J. C. T. D. S. **Estruturas de concreto armado**: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação. 3^a. ed. Brasília, DF: Elsevier, 2016.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3^a. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1974.

DEMARQUE, R. et al. Estudo Numérico e Experimental da Evolução Microestrutural e das Propriedades de Juntas Soldadas de Vergalhões pelo Processo GMAW. **Soldagem & Inspeção**, Volta Redonda, 4, n. 20, 12 Dez. 2015. 434-445.

DOS SANTOS, C. E. F. **Processos de Soldagem - Conceitos, Equipamentos e Normas de Segurança**. 1^a. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2015.

DOWLING, N. E. **Comportamento mecânico dos materiais**: análises de engenharia aplicadas a deformação, fratura e fadiga. 4^a. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

FILHO, C. H. M. A. **Análise da influencia da taxa de resfriamento no gradiente microestrutural de barras laminadas a quente tratadas termicamente**. Curitiba, PR: Programa de pós-graduação - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2004.

FORDER, B.; WALTERS, N. Sustainable Steel – Indicators 2017 and the future. **Worldsteel Assocation**, 2019. Disponível em: <<https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2017/sustainable-steel-indicators-2017-and-the-future/>>. Acesso em: 29 março 2021.

FORTES, C.; ARAÚJO, W. **Apostila de Metalurgia de Soldagem**. Contagem: ESAB BR, 2005.

FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de Rochas na Construção Civil**. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Geologia de Engenheiros, 2002.

FRAZÃO, E. B. et al. Agregados para construção civil no Brasil. **Revista Areia e Brita**, São Paulo, SP, 2007.

FURLANETTO, P. 03 formas de amarrar armaduras de vergalhões. **Neoipsum**, 2020. Disponível em: <<https://neoipsum.com.br/03-formas-de-amarrar-armaduras-de-concreto-armado/>>. Acesso em: 28 fevereiro 2021.

FUSCO, P. B. **Estruturas de Concreto**: Solicitações tangenciais. 1ª. ed. São Paulo, SP: PINI, 2008.

GARRISON, P. **Fundamentos de Estruturas**. São Paulo: Bookman, 2018.

GOECKS, C. **ANÁLISE DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS EM ESTRUTURAS**. Departamento de Tecnologia da Universidade Regional Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (Monografia em Engenharia Civil). Ujuí, RS. 2011.

IBRACON. **Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto**. CBC2008. Salvador. 2009.

IBRACON, INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Revista Concreto & Construções**, São Paulo, v. XXXVII, n. 53, 2009.

JUNIOR, T. F. D. S. **Concreto armado**. Notas de Aulas. Lavras, MG, p. 23. 2007.

KLEIN, N. S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de edificações e saneamento, Universidade Estadual de Londrina. Londrina, PR. 2008.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 3ª. ed. [S.I.]: Wiley, 2020.

LOGULLO, B. G. **Influência do Graute e da Taxa de Armadura no Comportamento da Alvenaria de Blocos de Concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UNESP. Ilha Solteira, p. 197. 2006.

LOTTI, R. S. et al. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Dental Press Ortodon Facial**, Maringá, v. 11, n. 2, p. 9, Abril 2006.

MALHOTRA, V. M.; N.J., C. **Handbook of nondestructive testing of concrete**. 2ª. ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

MARQUES, P. V. **Soldagem: fundações e tecnologia**. 3ª. ed. Belo Horizonte, MG: UFMG, 2009.

MARTINS, I. S. **ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO (AREIA) POR VIDRO MOÍDO NO CONCRETO CONVENCIONAL**. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia em Engenharia Civil) - UniEVANGÉLICA. Anápolis, GO, p. 70. 2018.

MATTOS, A. D. **Planejamento e Controles de Obras**. 1ª. ed. São Paulo: PINI, 2010.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª. ed. São Paulo, SP: IBRACON, 2008.

MIN, M. C. **Effect of Alloying Elements on Steels**. Descriptive approach- Steel Alloys. ed. [S.l.]: CMM NDT Services.

NAKAHARA, F. S. **Análise da viabilidade estrutural e econômica entre estruturas de concreto armado e estruturas metálicas**. Trabalho de Graduação (Monografia em Engenharia Civil). UNESP. Guaratinguetá, SP, p. 47. 2017.

NEVILLE, A. D. **Propriedades do Concreto**. 5ª. ed. São Paulo, SP: PINI, 2015.

NIKU, S. B. **Introduction to robotics: Analysis, systems, applications**. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

PADILHA, Â. F. **Materiais de Engenharia**. 1ª. ed. Curitiba: Hemus, 2006.

PEDROSO, F. L. Concreto: material construtivo mais consumido no mundo. **Revista Concreto & Construções**, São Paulo, SP, n. 53, 2009.

PILOTTO NETO, E. **Caderno de receitas de concreto armado: vigas**. 1ª. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, v. I, 2018.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. São Carlos, SP: Universidade de São Paulo, 2007.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D. **Notas de Aulas: Aderência e Ancoragem**. Unicamp. Campinas, SP, p. 16. 2003.

REBELLO, Y. C. P. **Bases para projeto estrutural**. São Paulo, SP: Zigurate, 2007.

REIS, A. P. A. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho**. Dissertação (Dissertação em Engenharia de Estruturas) – USP. São Carlos, p. 239. 1998.

SALIM NETO, J. J. **Diretrizes de projeto para melhorar a produtividade na montagem de componentes pré-cortados e pré-dobrados de aço para estruturas de concreto armado de edifícios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 259. 2009.

SENAI, S. N. D. A. I. **Armador de Ferros**. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2015.

SILVEIRA, C. A. M. **Aplicação de um planejamento fatorial para a avaliação das propriedades mecânicas do concreto com substituição do agregado miúdo por**

resíduo de vidro. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – UniFOA. Volta Redonda, RJ. 2016.

SOARES, A. P. F.; VASCONCELOS, L. T.; NASCIMENTO. **Corrosão em Armadura de Concreto.** Cadernos de Graduação: Ciências Exatas e Tecnológicas. Maceió, p. 177-188. 2015.

TÉCNICAS, A. B. D. N. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, p. 12. 2015.