UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PAULO HENRIQUE CARVALHO MELLO

DESEMPENHO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE USINAGEM METÁLICOS

MARINGÁ

2023

PAULO HENRIQUE CARVALHO MELLO

DESEMPENHO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE USINAGEM METÁLICOS

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre do programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof.ª Dr. Silvia Paula Sossai Altoé
Coorientador: Prof.° Dr. Gustavo Saleme de Miranda Gidrão

MARINGÁ

2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

Mello, Paulo Henrique Carvalho

M527d Desempenho de concretos estruturais com a incorporação de resíduos de usinagem metálicos / Paulo Henrique Carvalho Mello. -- Maringá, PR, 2023.
184 f. : il. color., figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Silvia Paula Sossai Altoé.
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Saleme de Miranda Gidrão.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

1. Concreto sustentável - Estruturas. 2. Resíduo de usinagem. 3. Agregados recíclaveis. 4. Limalha de aço. I. Altoé, Silvia Paula Sossai, orient. II. Gidrão, Gustavo Saleme de Miranda, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 23.ed. 693.5

Elaine Cristina Soares Lira - CRB-9/1202

PAULO HENRIQUE CARVALHO MELLO

DESEMPENHO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE USINAGEM METÁLICOS

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 26/02/2024, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Silvia Paula Sossai Altoé
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Professora Orientadora

Gustavo de Miranda S. Gidrão

Prof. Dr. Gustavo De Miranda Saleme Gidrão
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Professor Coorientador

Carlos H. Martins

Prof. Dr. Carlos Humberto Martins
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá

Sarah Honorato Lopes da Silva Tamura

Profa. Dra. Sarah Honorato Lopes da Silva Tamura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo apresentar os resultados obtidos para a investigação do comportamento de corpos de prova de concreto considerando três substituições parciais dos teores de agregado miúdo, graúdo e fibras metálicas, por resíduo industrial de limalha de aço. Este subproduto em especial, possui considerável potencial de aplicação no concreto, conforme visto em relevantes e recentes pesquisas realizadas. Conhecidas as propriedades mecânicas do aço, considera-se que a substituição parcial em concretos por resíduos dessa natureza possa atuar não apenas como um fator de melhora no comportamento do material, mas também como uma maneira de se produzir uma destinação eficiente ao resíduo em questão. Dessa forma, o trabalho justifica-se pelas suas potencialidades em relação à engenharia de materiais cimentícios e impactos ligados à sustentabilidade, realizando a substituição de agregados naturais por um subproduto do processo de usinagem. Para se investigar o material foram efetuados ensaios de caracterização visando a obtenção da absorção de água, índice de vazios, massa específica seca, real e aparente, resistência à tração e compressão e módulo de elasticidade tanto dinâmico quanto estático. Para tanto, foram utilizadas técnicas destrutivas e não-destrutivas. Questões envolvendo a durabilidade dos concretos produzidos foram averiguadas, com estes sendo imersos em soluções salinas agressivas por 180 dias, e após este período realizadas medições de geometria, massa e propriedades mecânicas. Também foram realizadas medições de resistividade elétrica pelo tempo para os traços, essa também relacionada com questões de durabilidade. Observou-se que a substituição dos agregados miúdos obtiveram os melhores resultados dentro da faixa estudada, com aumentos significativos na resistência tanto à tração quanto a compressão na ordem de 70%, além da melhora da qualidade dos concretos produzidos, com teor ótimo de substituição próximo a 10% da massa de cimento. A substituição de agregado graúdo demonstrou principalmente tendência dos melhores resultados em teores superiores que os estudados, ainda sim, foi obtido aumento próximo a 20% na resistência à compressão e tração, também maiores módulos de elasticidade, tanto dinâmico quanto estático. A substituição de fibra apresentou melhorias na resistência à compressão, com os resultados obtidos reforçando que, a limalha de aço (na geometria utilizada) atuou principalmente como agregado do concreto, sendo interessante a utilização para este fim de resíduos com geometrias diferentes.

Palavras-chave: Agregados recicláveis, Concreto sustentável, Resíduo metálico, Limalha de aço.

ABSTRACT

The present study aimed to present the results obtained from the investigation of the behavior of concrete specimens considering three partial substitutions of fine aggregate, coarse aggregate, and metallic fibers by industrial waste steel shavings. This particular waste has considerable potential for application in concrete, as evidenced by relevant and recent research. Given the known mechanical properties of steel, it is considered that partial substitution of such waste in concrete could not only improve the material's behavior but also provide an efficient disposal method for the waste in question. Thus, the study is justified by its potential regarding cementitious materials engineering and sustainability impacts, by substituting natural aggregates with a byproduct of the machining process. Characterization tests were conducted to investigate the material, aiming to determine water absorption, void ratio, dry, real, and apparent specific gravity, tensile and compressive strength, as well as dynamic and static modulus of elasticity. Both destructive and non-destructive techniques were employed for this purpose. Issues related to the durability of the produced concretes were examined by immersing them in aggressive saline solutions for 180 days, followed by measurements of geometry, mass, and mechanical properties. Electrical resistivity measurements over time for the mixtures were also conducted, which are also related to durability issues. It was observed that the substitution of fine aggregates yielded the best results within the studied range, with significant increases in both tensile and compressive strength by approximately 70%, along with improvements in the quality of the produced concretes, with an optimal substitution content close to 10% of the cement mass. The substitution of coarse aggregate primarily showed a tendency for better results at higher levels than those studied, still achieving an increase of nearly 20% in both compressive and tensile strength, as well as higher dynamic and static moduli of elasticity. The substitution of fibers resulted in improvements in compressive strength, with the findings indicating that steel shavings (in the geometry used) mainly acted as aggregate in the concrete, suggesting the potential use of waste with different geometries for this purpose.

Key-words: Recyclable Aggregates, Sustainable Concrete, Steel Waste, Steel Chip.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Configuração *Slum-test*.....27
Figura 2.2 - Configuração do ensaio de tração indireta.....30
Figura 2.3 - Configuração do ensaio de flexão da NBR 16940.....30
Figura 2.4 - Configuração do ensaio da NBR 8522.....33
Figura 2.5 - Determinação direta.....33
Figura 2.6 - Determinação indireta.....34
Figura 2.7 - Determinação semidireta.....34
Figura 2.8 - Formação de limalhas metálicas.....38
Figura 2.9 - Classificação dos resíduos conforme ISO 3685:2017.....39
Figura 2.10 - Resíduos utilizados por Mostofinejad e Kesshavarz.....42
Figura 2.11 - Resíduos utilizados por Malek *et al.*.....43
Figura 2.12 - Resíduos utilizados por Althoey e Hosen.....43
Figura 2.13 - Resíduos utilizados por Çelic *et al.*.....44
Figura 3.1 – Programa experimental.....45
Figura 3.2 – Fibras de aço utilizada.....48
Figura 3.3 – Configuração típica do *Slump Test*.....49
Figura 3.4 – Corpos de prova em estufa.....50
Figura 3.5 – Corpos de prova submersos.....51
Figura 3.6 – Configuração do ensaio de compressão.....53
Figura 3.7 – Ensaio utilizando *Sonelastic*.....55
Figura 3.8 – Ensaio utilizando ultrassom em posição direta.....56
Figura 3.9 – Corpos de prova imersos na solução salina.....57
Figura 3.10 – Configuração do ensaio de resistividade elétrica.....58
Figura 3.11 – Representação do circuito do ensaio de resistividade elétrica.....59
Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos.....60
Figura 4.2 – Granulometria dos agregados graúdos.....61
Figura 4.3 – Resíduos utilizados.....61
Figura 4.4 – Resíduos utilizados – Dimensões aferidas.....62
Figura 4.5 – Aspecto típico dos corpos de prova moldados.....64
Figura 4.6 – Absorção de água das substituições de agregado miúdo.....67
Figura 4.7 – Absorção de água por teor de substituição de agregado miúdo.....68

Figura 4.8 – Índice de vazios das substituições de agregado miúdo.....69
Figura 4.9 – Índice de vazios por teor substituição de agregado miúdo.....70
Figura 4.10 – Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de agregado miúdo.....72
Figura 4.11 – Comparação das médias obtidas entre cada traço.....72
Figura 4.12 – Resistência a compressão em relação ao teor de substituição de agregado miúdo.....73
Figura 4.13 – Evolução da resistência à compressão para as substituições de agregado miúdo.....75
Figura 4.14 – Resistência a tração indireta aos 28 dias das substituições de agregado miúdo.....76
Figura 4.15 – Comparação das médias obtidas entre cada traço na tração indireta.....77
Figura 4.16 – Relação da velocidade de onda do ultrassom com qualidade do concreto.....78
Figura 4.17 – Módulo de elasticidade para cada substituição de agregado miúdo.....79
Figura 4.18 – Módulo de elasticidade dinâmico por teor de substituição de agregado miúdo 80
Figura 4.19 – Módulo de elasticidade (*Sonelastic)* para cada substituição de agregado miúdo.....81
Figura 4.20 – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)* por teor de substituição de agregado miúdo.....82
Figura 4.21 – Curvas tensão por deformação para as substituições de agregados miúdo..83
Figura 4.22 – Módulo de elasticidade estático por teor de substituição de agregado miúdo.....84
Figura 4.23 – Carga de ruptura à compressão X Módulo estático.....85
Figura 4.24 – Índice de vazios X Módulo dinâmico (Ultrassom).....86
Figura 4.25 – Índice de vazios X Carga de ruptura à compressão.....87
Figura 4.26 –Velocidade de propagação de ondas de ultrassom X Carga de ruptura à compressão.....87
Figura 4.27 –Velocidade de propagação de ondas de ultrassom X Carga de ruptura à tração.....88
Figura 4.28 –Módulos de elasticidade obtidos para as substituições de agregados miúdos.....89

Figura 4.29 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*.....92
Figura 4.30 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom).....92
Figura 4.31 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Resistência à compressão.....93
Figura 4.32 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de agregado miúdo) – Solução de 5% de sulfato de sódio.....94
Figura 4.33 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*.....96
Figura 4.34 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom).....96
Figura 4.35 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Resistência a compressão.....97
Figura 4.36 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de agregado miúdo)– Solução de 10% de sulfato de sódio.....98
Figura 4.37 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*.....100
Figura 4.38 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom).....100
Figura 4.39 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Resistência a compressão.....101
Figura 4.40 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de agregado miúdo) – Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio.....102
Figura 4.41 – Resistividade elétrica por tempo – Substituições de agregados miúdos.....104
Figura 4.42 – Absorção de água das substituições de agregado graúdo.....105
Figura 4.43 – Absorção de água por teor de substituição de agregado graúdo.....106
Figura 4.44 – Índice de vazios das substituições de agregado graúdo.....107
Figura 4.45 – Índice de vazios por teor de substituição de agregado graúdo.....107
Figura 4.46 – Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de agregado graúdo.....109
Figura 4.47 – Resistência a compressão em relação ao teor de substituição de agregado graúdo.....109

Figura 4.48 – Evolução da resistência à compressão para as substituições de agregado graúdo.....111
Figura 4.49 – Resistência a tração indireta aos 28 dias das substituições de agregado graúdo.....112
Figura 4.50 – Resistência a tração em relação ao teor de substituição de agregado graúdo.....113
Figura 4.51 – Módulo de elasticidade para cada substituição de agregado graúdo.....114
Figura 4.52 – Módulo de elasticidade dinâmico por teor de substituição de agregado graúdo.....115
Figura 4.53 – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)* por teor de substituição de agregado graúdo.....116
Figura 4.54 – Módulo de elasticidade dinâmico (Sonelastic) por teor de substituição de agregado graúdo.....116
Figura 4.55 – Curvas tensão por deformação para as substituições de agregados graúdos.....117
Figura 4.56 – Módulo de elasticidade estático por teor de substituição de agregado graúdo 118
Figura 4.57 – Carga de ruptura à compressão X Módulo estático.....119
Figura 4.58 – Índice de vazios X Módulo dinâmico (Ultrassom).....120
Figura 4.59 – Índice de vazios X Carga de ruptura à compressão.....121
Figura 4.60 –Velocidade de propagação de ondas de ultrassom X Carga de ruptura à compressão.....121
Figura 4.61 –Velocidade de propagação de ondas de ultrassom X Carga de ruptura à tração.....122
Figura 4.62 –Módulos de elasticidade obtidos para as substituições de agregados miúdos.....123
Figura 4.63 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*.....126
Figura 4.64 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)..... 126
Figura 4.65 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Resistência à compressão.....127
Figura 4.66 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de

agregado graúdo) – Solução de 5% de sulfato de sódio.....128
Figura 4.67 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*.....130
Figura 4.68 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom).....130
Figura 4.69 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Resistência a compressão.....131
Figura 4.70 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de agregado graúdo) – Solução de 10% de sulfato de sódio.....132
Figura 4.71 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*.....134
Figura 4.72 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom).....134
Figura 4.73 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Resistência a compressão.....135
Figura 4.74 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de agregado graúdo) – Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio.....136
Figura 4.75 – Resistividade elétrica por tempo – Substituições de agregados graúdos.....137
Figura 4.76 – Absorção de água das substituições de fibras de aço.....138
Figura 4.77 – Absorção de água por teor de substituição de fibras de aço.....139
Figura 4.78 – Índice de vazios das substituições de fibras de aço.....140
Figura 4.79 – Índice de vazios por teor de substituição de fibras de aço.....140
Figura 4.80 – Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de fibras de aço....142
Figura 4.81 – Resistência a compressão em relação ao teor de substituição de fibras de aço.....142
Figura 4.82 – Evolução da resistência à compressão para as substituições de fibras metálicas.....143
Figura 4.83 – Resistência a tração indireta aos 28 dias das substituições de fibras de aço.....145
Figura 4.84 – Resistência a tração em relação ao teor de substituição de fibras de aço..145
Figura 4.85 – Módulo de elasticidade para cada substituição de fibras.....147
Figura 4.86 – Módulo de elasticidade dinâmico por teor de substituição de fibras de aço 147

Figura 4.87 – Índice de vazios X Módulo dinâmico (Ultrassom).....149
Figura 4.88 – Índice de vazios X Carga de ruptura à compressão.....150
Figura 4.89 –Velocidade de propagação de ondas de ultrassom X Carga de ruptura à compressão.....150
Figura 4.90 –Velocidade de propagação de ondas de ultrassom X Carga de ruptura à tração.....151
Figura 4.91 –Módulos de elasticidade obtidos para as substituições de fibras de aço.....152
Figura 4.92 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*..... 155
Figura 4.93 – Figura 4.93 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom).....155
Figura 4.94 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Resistência a compressão.....156
Figura 4.95 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de fibras de aço) – Solução de 10% de sulfato de sódio.....157
Figura 4.96 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*.....159
Figura 4.97 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)..... 159
Figura 4.98 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Resistência à compressão.....160
Figura 4.99 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*.....162
Figura 4.100 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom).....162
Figura 4.101 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Resistência a compressão.....163
Figura 4.102 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de fibras de aço) – Solução de 10% de sulfato de sódio.....164
Figura 4.103 – Resistividade elétrica por tempo – Substituições de fibras de aço.....165

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de cimentos.....25
Tabela 2.2 – Exemplos de pesquisas utilizando limalha de aço no concreto.....41
Tabela 3.1 - Quantitativo de corpos de prova cilíndricos.....46
Tabela 3.2 – Composição unitário dos traços.....48
Tabela 4.1 – Resíduos utilizados – Dimensões aferidas.....62
Tabela 4.2 – Massa unitária dos agregados.....63
Tabela 4.3 – Propriedades do aglomerante utilizado.....63
Tabela 4.4 – Peso médio dos corpos de prova.....64
Tabela 4.5 – Resultados do abatimento do tronco de cone.....65
Tabela 4.6 – Massas específicas.....66
Tabela 4.7– Absorção de água das substituições de agregado miúdo.....67
Tabela 4.8 – Índice de vazios das substituições de agregado miúdo.....69
Tabela 4.9 – Massas específicas das substituições de agregado miúdo.....70
Tabela 4.10– Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de agregado miúdo.....71
Tabela 4.11 – Evolução da resistência à compressão para as substituições de agregado.....74
Tabela 4.12 – Resistência a tração indireta aos 28 dias das substituições de agregado miúdo..76
Tabela 4.13 – Velocidade das ondas de ultrassom – Substituição de agregado miúdo.....78
Tabela 4.14 – Módulo de elasticidade para cada substituição de agregado miúdo.....79
Tabela 4.15 – Módulo de elasticidade (*Sonelastic)* para cada substituição de agregado miúdo.....81
Tabela 4.16 – Módulo de elasticidade estático para substituições de agregado miúdo.....84
Tabela 4.17 –Módulos de elasticidade obtidos para as substituições de agregados miúdos....89
Tabela 4.18 – Variações das massas dos corpos de prova – Antes e após imersão.....90
Tabela 4.19 – Propriedades mecânicas – 5% de sulfato de sódio.....91
Tabela 4.20 – Propriedades mecânicas – 10% de sulfato de sódio.....95
Tabela 4.21 – Propriedades mecânicas – 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio....99
Tabela 4.22 – Absorção de água das substituições de agregado graúdo.....105
Tabela 4.23 – Índice de vazios das substituições de agregado graúdo.....106
Tabela 4.24 – Massas específicas das substituições de agregado graúdo.....108
Tabela 4.25 – Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de agregado graúdo...108
Tabela 4.26 – Evolução da resistência à compressão para as substituições de agregado graúdo.....110
Tabela 4.27– Resistência a tração indireta aos 28 dias das substituições de agregado

graúdo.....112
Tabela 4.28 – Velocidade das ondas de ultrassom – Substituição de agregado graúdo.....113
Tabela 4.29 – Módulo de elasticidade para cada substituição de agregado graúdo.....114
Tabela 4.30 – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)* por teor de incorporação.....115
Tabela 4.31 – Módulo de elasticidade estático para substituições de agregado graúdo.....118
Tabela 4.32 –Módulos de elasticidade obtidos para as substituições de agregados graúdos..122
Tabela 4.33 – Variações das massas dos corpos de prova – Antes e após imersão.....124
Tabela 4.34 – Propriedades mecânicas – Solução de 5% de sulfato de sódio.....125
Tabela 4.35 – Propriedades mecânicas – Solução de 10% de sulfato de sódio.....129
Tabela 4.36 – Propriedades mecânicas – Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio.....133
Tabela 4.37 – Absorção de água das substituições de fibras de aço.....138
Tabela 4.38 – Índice de vazios das substituições de fibras de aço.....140
Tabela 4.39 – Massas específicas das substituições de fibras de aço.....141
Tabela 4.40 – Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de fibras de aço.....141
Tabela 4.41 – Evolução da resistência à compressão para as substituições de fibras metálicas.....143
Tabela 4.42 – Resistência a tração indireta aos 28 dias das substituições de fibras de aço.....144
Tabela 4.43 – Velocidade das ondas de ultrassom – Substituição de fibras de aço.....146
Tabela 4.44 – Módulo de elasticidade para cada substituição de fibras.....146
Tabela 4.45 – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)* por teor de incorporação.....148
Tabela 4.46 –Módulos de elasticidade obtidos para as substituições de fibras de aço.....151
Tabela 4.47 – Variações das massas dos corpos de prova – Antes e após imersão.....153
Tabela 4.48 – Propriedades mecânicas das substituições de fibras – Solução de 5% de sulfato de sódio.....154
Tabela 4.49 – Propriedades mecânicas das substituições de fibras – Solução de 10% de sulfato de sódio.....158
Tabela 4.50 – Propriedades mecânicas das substituições de fibras – Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio.....161
Tabela 4.51 – Resumo dos resultados obtidos.....166

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....19
1.1 JUSTIFICATIVAS.....20
1.2 OBJETIVOS.....21
1.2.1 Objetivo geral.....21
1.2.2 Objetivos específicos.....22
2 REVISÃO DE LITERATURA.....23
2.1 CONCRETO COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS.....23
2.1.1 Cimento Portland.....23
2.1.2 Agregados.....25
2.1.3 Fibras metálicas.....26
2.1.4 Propriedades do concreto.....26
2.1.4.1 Trabalhabilidade.....26
2.1.4.2 Resistências do Estado Endurecido.....28
2.1.4.2.1 Resistência à compressão.....28
2.1.4.2.2 Resistência à tração.....29
2.1.4.3 Absorção de Água.....30
2.1.4.4 Módulo de Elasticidade.....31
2.1.4.4.1 Módulo de elasticidade através da frequência natural de vibração do concreto.....32
2.1.4.4.2 Determinação do módulo de elasticidade através da leitura de ondas de ultrassom.....33
2.1.4.5 Durabilidade.....34
2.1.4.5.1 Efeitos de sulfatos no concreto.....35
2.1.4.5.2 A penetração de íons de cloreto no concreto.....36
2.1.4.5.3 Determinação dos parâmetros de durabilidade através da resistividade elétrica....37
2.2 RESÍDUOS DE USINAGEM - ORIGEM E FORMAÇÃO.....37
2.2.4 Caracterização e classificação.....39
2.2.5 Reciclagem do resíduo.....39
2.2.5.2 Utilização Como Constituinte no Concreto.....40
3 **MATERIAIS E MÉTODOS.....45**
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....45
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....46

3.1.1 Agregado miúdo.....47
3.1.2 Agregado Graúdo 47
3.1.3 Resíduo de usinagem e fibras comerciais 47
3.2 DOSAGEM DO CONCRETO.....48
3.3 PROCESSO DE MISTURA E CURA.....49
3.4 PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO.....49
3.4.1 Determinação da consistência pelo ensaio de abatimento de tronco de cone..49
3.4.2 Determinação da massa específica.....49
3.5 PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO.....50
3.5.1 Determinação da absorção de água.....50
3.5.2 Determinação das resistências.....52
3.5.2.1 Resistência à compressão.....52
3.5.2.2 Resistência à tração por compressão diametral.....53
3.5.3 **Determinação do módulo de elasticidade.....54**
3.5.3.1 Módulo de elasticidade dinâmico com *Sonelastic*.....54
3.5.3.2 Velocidade de propagação de onda de ultrassom.....55
3.5.4 Ensaio de imersão de corpos de prova em solução salina agressiva.....56
3.5.5 Ensaio de resistividade elétrica.....57
3.6 ANÁLISE DE VARIÂNCIA E APROXIMAÇÕES NÃO LINEARES.....59
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....60
4.1 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS.....60
4.2 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS CORPOS DE PROVA.....63
4.3 PROPRIEDADES DO ESTRADO FRESCO.....64
4.3.1 Abatimento de tronco de cone.....64
4.3.2 Massa específica.....65
4.4 PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO.....66
4.4.1 Substituição do agregado miúdo por limalha.....67
4.4.1.1 Absorção de água, índice de vazios e massas específicas.....67
4.4.1.2 Resistência à compressão.....71
4.4.1.3 Resistência à tração indireta.....75
4.4.1.4 Módulo de elasticidade dinâmico – NBR 8802 (Ultrassom).....77
4.4.1.5 Módulo de elasticidade dinâmico - NBR 8522 (*Sonelastic)*.....81
4.4.1.6 Módulo de elasticidade estático – NBR 8522-1.....82
4.4.1.7 Correlações entre as resistências obtidas e os módulos de elasticidade.....85

4.4.1.8 Análise de corpos de prova após a imersão em solução agressiva.....89
4.4.1.8.1 Solução de 5% de sulfato de sódio – Propriedades mecânicas.....91
4.4.1.8.2 Solução de 10% de sulfato de sódio – Propriedades mecânicas.....95
4.4.1.8.3 Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio – propriedades mecânicas.....99
4.4.1.8.4 Considerações gerais dos resultados do ensaio de imersão.....103
4.4.1.9 Resistividade elétrica.....103
4.4.2 Substituição do agregado graúdo por limalha.....104
4.4.2.1 Absorção de água, índice de vazios e massas específicas.....104
4.4.2.2 Resistência à compressão.....108
4.4.2.3 Resistência à tração indireta.....111
4.4.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico – NBR 8802 (Ultrassom).....113
4.4.2.5 Módulo de elasticidade dinâmico - NBR 8522 (*Sonelastic)*.....115
4.4.2.6 Módulo de elasticidade estático – NBR 8522-1.....117
4.4.2.7 Correlações entre as resistências obtidas e os módulos de elasticidade.....119
4.4.2.8 Análise de corpos de prova após a imersão em solução agressiva.....123
4.4.2.8.1 Solução de 5% de sulfato de sódio – Propriedades mecânicas.....124
4.4.2.8.2 Solução de 10% de sulfato de sódio – Propriedades mecânicas.....129
4.4.2.8.3 Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio – propriedades mecânicas.....133
4.4.2.8.4 Considerações gerais dos resultados do ensaio de imersão.....137
4.4.2.9 Resistividade elétrica.....137
4.4.3 Substituição do fibras de aço por limalha.....138
4.4.3.1 Absorção de água, índice de vazios e massas específicas.....138
4.4.3.2 Resistência à compressão.....141
4.4.3.3 Resistência à tração indireta.....144
4.4.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico – NBR 8802 (Ultrassom).....146
4.4.3.5 Módulo de elasticidade dinâmico - NBR 8522 (*Sonelastic)*.....148
4.4.3.6 Correlações entre as resistências obtidas e os módulos de elasticidade.....148
4.4.3.7 Análise de corpos de prova após a imersão em solução agressiva.....152
4.4.3.7.1 Solução de 5% de sulfato de sódio – Propriedades mecânicas.....153
4.4.3.7.2 Solução de 10% de sulfato de sódio – Propriedades mecânicas.....157
4.4.3.7.3 Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio – propriedades mecânicas.....161

4.4.3.7.4 Considerações gerais dos resultados do ensaio de imersão.....164
4.4.3.8 Resistividade elétrica.....165
4.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS DOS RESULTADOS OBTIDOS.....166
5 **CONCLUSÕES.....167**
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....168
6 REFERÊCIAS.....169
APÊNDICE A – Valores obtidos nas medições de cada traço.....178

1 INTRODUÇÃO

Na indústria da construção civil, uma variedade de materiais é utilizada, com diversas características, sendo o concreto um dos mais importantes. Este segmento não apenas utiliza uma quantidade considerável de recursos naturais, mas também depende significativamente de fontes não renováveis, especialmente aquelas de origem mineral. Além disso, desempenha um papel importante na emissão de poluentes, sendo um dos principais contribuintes para a geração de resíduos sólidos urbanos (FERREIRA, LIMA, 2013).

O concreto fabricado com Cimento Portland, é considerado um dos materiais mais importantes na construção civil, com seu consumo pela humanidade inferior apenas a água, sendo um marco de revolução para os projetos e construções das estruturas (ISAIA, 2010).

A ampla utilização deste material é dada ao menos por três principais fatores; a excelente resistência à água (com relação a degradação); diversidade de formas e tamanhos em que os elementos estruturais podem ser moldados, devido a plasticidade e trabalhabilidade no estado fresco; e acessibilidade como material de construção, com os principais componentes tendo disponibilidade de mercado em diversos países e regiões (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

Das propriedades deste material na construção civil, algumas são de suma importância para sua devida aplicabilidade, normalmente separadas em propriedades do estado fresco e estado endurecido. Segundo Neville (2016), se tratando do estado endurecido, a resistência quanto ao esforço de compressão do concreto é a propriedade mais importante, estando ligada diretamente a ideia de qualidade do material produzido, sendo sempre especificada em projetos estruturais. Considerando o estado fresco do concreto, a propriedade que se destaca é a consistência, influenciando diretamente a facilidade de transporte, lançamento, adensamento e acabamento deste material.

O concreto é classificado como um material compósito, fundamentalmente constituído em um meio aglomerante onde estão unidos fragmentos dos agregados empregados na mistura. Nesse contexto, a função aglomerante é desempenhada pela combinação de cimento hidráulico e água (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

Além destes materiais básicos, o concreto também permite a adição de diversos materiais diferentes visando a melhoria de suas principais propriedades, como por exemplo, adições minerais, aditivos químicos, fibras metálicas ou sintéticas, além de outros materiais recicláveis, como resíduos, oriundos de diferentes fontes.

A incorporação de resíduos no concreto além de poder aprimorar determinadas propriedades tanto do estado fresco quanto endurecido ainda oferece uma solução para o

descarte adequado desses materiais, conforme visto em pesquisas recentes, citadas posteriormente.

Além disso, uma vez que, os agregados convencionais frequentemente derivam de recursos naturais, a substituição por materiais alternativos contribui para mitigar a escassez desses recursos. Segundo dados da Associação Nacional de Produtores de Agregados para a Construção (ANEPAC) o consumo de areia e brita alcançaram o valor de 605 milhões de toneladas em 2020, aumentando para 659 milhões em 2021. Neste estudo, o foco é a utilização de resíduos metálicos provenientes do processo de usinagem substituindo agregados e fibras no concreto.

Os resíduos de usinagem são formados pelos processos que garantem forma e acabamento para peças metálicas, normalmente aços e alumínio, obtidas por conta da retirada de material. Este material retirado é o resíduo gerado por este processo, sendo denominado como limalha metálica (MACHADO *et al*., 2015).

Os resíduos de usinagem representam cerca de 3 a 5% do peso de fundição do aço, estando assim intimamente ligados a produção deste material, além de que, é possível estimar que por dia de trabalho um torno (equipamento usualmente utilizado) pode gerar cerca de 3 a 4 Kg deste resíduo (MALEK *et al*., 2021).

Mesmo ao serem submetidos a processos de reciclagem, os resíduos metálicos tradicionalmente demandam um consumo significativo de energia e uma grande quantidade de mão de obra. Além disso, esses processos muitas vezes têm o potencial de gerar novos resíduos (JASSIN, 2017).

Há também casos em que empresas do setor não fazem o devido armazenamento das limalhas metálicas, mantendo estas em contato direto com o solo, podendo ocasionar a contaminação do mesmo e dos recursos hídricos da região através da infiltração de óleos presentes nos resíduos(RODRIGUES, 2018).

De acordo com um relatório realizado pela ICI (*Investment Company Institute*) a geração deste resíduo já alcançou cerca de 1200 milhões de toneladas ao ano, demonstrando assim a importância de se buscar formas alternativas de reciclagem destes resíduos que se mostrem interessantes do ponto de vista econômico e energético.

1.1 JUSTIFICATIVAS

O resíduo de usinagem metálico pode se tornar um grande problema do ponto de vista ambiental, quando não tratado da maneira correta e descartados de maneira indevida, por ser composto essencialmente de aço ou outros materiais metálicos impregnados por óleos.

Sua geração é proporcional a produção de aço, que, de acordo com dados da *Word Steel Association* (2020), alcançou em 2019 o valor de 1869,9 milhões de toneladas, um aumento de aproximadamente 3,4% em relação ao ano anterior.

Conforme o Instituto Aço Brasil (2022), somente no país em 2021 a produção de aço alcançou 36,2 milhões de toneladas, representando um aumento de cerca de 15% para o ano anterior, e representando 55,9% de toda a produção da américa latina, um consequente aumento também no número de resíduos de usinagem gerados.

De acordo com a norma NBR 10004 (ABNT, 2004), a limalha de aço é considerada um resíduo sólido, que, de acordo com a política nacional de resíduos sólidos expressa na Lei n° 12.305/2010, o seu gerenciamento deve ser realizado por um conjunto de ações que envolvem as etapas de transporte, transbordo e o tratamento com destinação final ambientalmente adequada.

Os estudos a respeito da utilização dos resíduos metálicos de aço no concreto vêm demonstrando incrementos consideráveis de propriedades, como, aumento das resistências mecânicas de compressão e tração, de módulo de elasticidade, características térmicas e até comportamento adequado como fibra de aço, como vistos nos trabalhos de Mostofinejad e Kesshavarz (2019), Althoey e Hosen (2021), Malek *et al.* (2021) e Çelik *et al.* (2022) que serão abordados em capítulos seguintes.

A justificativa deste trabalho em inserir este material no concreto, é baseado na contribuição positiva nas propriedades mecânicas visto em diversas pesquisas relevantes e recentes, determinando os melhores teores e tipos de incorporações deste material no concreto, a fim de auxiliar na viabilização deste compósito como material estrutural da construção civil, ao mesmo tempo em que se garante ao resíduo, uma destinação final com potencial de menos agressividade para o meio, com menor gasto energético, juntamente com economia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo a incorporação de resíduos metálicos oriundos da usinagem como substituições aos materiais constituintes do concreto, para três casos distintos,

os agregado miúdos, graúdos e fibras metálica, com a respectiva análise das principais propriedades do estado fresco e endurecido, além da avaliação dos concretos produzidos frente a deterioração em decorrência do ataque de sulfatos e cloretos.

1.2.2 Objetivos específicos

Se tratando dos objetivos específicos desde trabalho têm-se:

1. Analisar a influência das substituições feitas no concreto, nas propriedades no estado fresco, como medida da consistência e massa específica, e estado endurecido analisando, resistência a compressão, tração, absorção de água e módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ultrassom.
2. Definir os melhores teores para os três tipos de substituições realizadas, a de agregados miúdos, a de agregados graúdos e a de fibras pelos resíduos, levando em consideração todos os resultados obtidos nos ensaios de cada tipo de substituição;
3. Avaliar o desempenho de durabilidade dos concretos produzidos quanto ao ataque de sulfatos e cloretos, através de ensaios de imersão e resistividade elétrica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONCRETO: COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS

A norma NBR 12655 (ABNT, 2022) define concreto como sendo, o material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo, graúdo e água, com ou sem incorporação de componentes secundários (aditivos químicos ou adições minerais), com desenvolvimento das propriedades através do endurecimento da pasta formada por cimento e água.

O concreto é classificado de acordo com as características que possui, por exemplo, concretos leves, abrangem aqueles que possuem uma massa específica inferior a 1800 Kg/m³, por sua vez, para os concretos pesados este valor chega a ser superior a 3200 Kg/m³, outra classificação é a que engloba as faixas de resistência a compressão, fundamental para o dimensionamento das estruturas (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

Embora normalmente relacionado ao material composto de cimento, água, areia e pedra britada, o concreto não se resume à apenas esta constituição, podendo possuir, aditivos químicos, adições minerais, agregados recicláveis, materiais fibrosos, entre outros componentes (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

A análise das proporções dos diferentes componentes na mistura de concreto é uma busca constante, visando atender às exigências das propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade necessárias para a aplicação do material. A NBR 6118 (ABNT, 2021), define os principais requisitos para projetos e execução de estruturas de concreto, que segundo esta norma, devem possuir, segurança, estabilidade, durabilidade e funcionalidade.

As resistências mecânicas do concreto em seu estado endurecido são de suma importância para a elaboração de qualquer projeto estrutural, porém, o estudo da relação tensão e deformação em um intervalo de tempo longo também se mostra vital, pois, sempre há uma deformação associada diretamente a uma tensão.

O concreto é até certo ponto um material elástico, mas seu comportamento não é puramente linear, ainda existem deformações que não estão associadas diretamente com carregamentos aplicados, como as deformações causadas pela retração do concreto na secagem (NEVILLE, 2016).

2.1.1 Cimento Portland

Conforme estabelecido pela NBR 11172 (ABNT, 1990) "Aglomerantes de Origem Mineral", um aglomerante é definido como um material de origem mineral, geralmente apresentado na forma de pó. Ao ser misturado com água, forma uma pasta com propriedades aglutinantes. Essa pasta pode ser classificada como hidráulica, quando o aglomerante reage com a água, mantendo suas propriedades. Em outras palavras, endurece principalmente devido a reações químicas com a água, sendo o processo de endurecimento conduzido por meio de reações de hidratação ou processos químicos.

Do pondo de vista brasileiro, o principal aglomerante mineral utilizado para a produção de concreto é o Cimento Portland, sendo que deste, as variações mais utilizadas são CPII e CPV-ARI, porém, existem outros tipos de aglomerantes, utilizados para outras funções além da produção de concreto, tais como o gesso e a cal (Diprotec, 2023).

As matérias-primas para a produção de cimento Portland incluem rochas calcárias e argila, que passam por um processo de moagem e, em seguida, são submetidas à queima em fornos rotativos. Durante esse processo, esses materiais são sintetizados e parcialmente fundidos, assumindo a forma de pequenas esferas conhecidas como clínqueres. Após o resfriamento, os clínqueres são combinados com sulfato de cálcio. Essa mistura é então moída até se transformar em um pó extremamente fino, que é denominado cimento Portland (NEVILLE, 2016).

De acordo com Battagin (2011), para a produção do clínquer, é necessário utilizar um material inicial que contenha em sua composição química os principais óxidos, que são o C_aO, S_iO e Fe_2O_3. Geralmente, esses componentes não são encontrados em proporções adequadas em uma única rocha, razão pela qual é comum a realização da mistura de dois ou mais tipos de rochas.

O cimento Portland e suas modificações constituem os cimentos hidráulicos ou resistentes à água, o desenvolvimento das resistências mecânicas do concreto estão diretamente ligadas com as reações químicas que ocorrem entre os componentes do cimento com a água. (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

A fluidez da mistura de concreto está relacionada com a pasta formada por Cimento Portland e o percentual de água, esta pasta por sua vez envolve os outros constituintes presentes no concreto, tais como agregados, adições minerais e aditivos químicos, criando assim um material que nas horas iniciais tem a capacidade de se moldar nas mais diferentes formas e tamanhos, sofrendo após um tempo um processo irreversível de endurecimento adquirindo resistência mecânica e consequente desempenho estrutural (ISAIA, 2010).

Os tipos de cimento Portland disponíveis no mercado estão organizadas de acordo com a Tabela 2.1 Abaixo:

Tabela 2.1 - Tipos de cimentos

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + Sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto- forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland Comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 - 100	0 - 5		
	CP I-S			90 - 94	0	0	6 -10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP-II-E			51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP-II-Z			71 -94	0	6 -14	0 - 15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F			75 - 89	0	0	0 - 15
Cimento Portland de alto forno	CP III			25 - 65	35 -75	0	11 - 25
Cimento Portland pozolânico	CP IV			45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
Cimento Portland de alta resistência incial	CP V	ARI		90 - 100	0	0	0 - 10

Fonte: Adaptado da NBR 16697 (2018)

2.1.2 Agregados

Conforme a norma NBR 7211 (ABNT, 2005) "Agregados para Concreto – Especificações", os agregados são categorizados em miúdos e graúdos. No caso dos agregados miúdos, os grãos passam pela peneira de 4,75 milímetros e ficam retidos na de 150 micrômetros. Já para os agregados graúdos, os grãos devem passar pela peneira de 75 milímetros e ficar retidos na de 4,75 milímetros.

As partículas dos agregados naturais, são originadas de uma massa maior, fragmentada por processos naturais ou britagem artificial. Suas propriedades, como composição química, massa específica e absorção, dependem da rocha matriz, porém, algumas características, como forma e dimensões das partículas, não são inerentes à rocha matriz. Todas essas propriedades impactam a qualidade do concreto em seu estado fresco e endurecido (NEVILLE, 2008).

As características dos agregados exercem influência direta nas propriedades dos concretos. A massa específica dos agregados utilizados está intimamente relacionada à massa específica do concreto produzido. Em outras palavras, quando há a necessidade de utilizar concretos leves, é imperativo que os agregados que compõem a mistura apresentem massa específica reduzida. Além disso, a resistência do concreto é diretamente impactada pela porosidade, forma e rugosidade dos agregados que o constituem. Portanto, esses materiais desempenham um papel crucial na fabricação e dosagem dessa matriz cimentícia (BUTTLER, 2003).

A qualidade do concreto é diretamente afetada pela qualidade dos materiais empregados. Por isso, é crucial conhecer as características dos agregados por meio de ensaios laboratoriais (AZEVEDO *et al*., 2017).

2.1.3 Fibras metálicas

Concreto reforçado com fibras é definido como sendo, a mistura do concreto convencional com fibras, atuantes como reforço, sendo distribuídas uniformemente na mistura. O grau de melhora no concreto está atrelado a alguns fatores como, teor de fibras, geometria e tipo de fibras e o processo de mistura (RAI, JOSHI, 2014), os principais tipos utilizados são as de aço, vidro e polipropileno.

A utilização de fibras de aço no concreto é interessante principalmente para o aumento da capacidade de absorção da energia pós fissuração, incremento da resistência ao impacto e à fadiga por flexão (ACI COMITTE, 1996).

As fibras de aço também possuem alto módulo de elasticidade, podendo ser utilizadas como reforço primário para o concreto, indo além de apenas controle de fissuração (FIGUEIREDO, 2000).

A fissuração interna do concreto reforçado com fibras de aço se dá semelhante ao concreto convencional, porém, o avanço da fissuração é retardado pela presença de fibras, sendo assim, essas não evitam o surgimento de fissuras, mas sim a propagação das mesmas pela matriz (SINGH, 2017).

No ano de 2021 entraram em vigor no Brasil, um conjunto de normas que visam estipular parâmetros de projeto, ensaios e qualidade para concreto reforçado com fibras, são estas a NBR 16940, NBR 16939, NBR 16935 e a NBR 16938, demonstrando a tendência do crescimento do mercado e utilização de fibras no concreto, consequentemente a importância de estudos para a otimização da utilização destes materiais no concreto.

2.1.4 Propriedades do concreto

2.1.4.1 Trabalhabilidade

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), trabalhabilidade do concreto é a propriedade que determina o esforço exigido para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. A ASTM C125 (2021) define de forma semelhante a

trabalhabilidade no concreto, sendo a propriedade que mede o esforço necessário para adensar, lançar e realizar o acabamento com a perda mínima de homogeneidade da mistura, esta propriedade do concreto é fundamental para determinar a facilidade de utilização deste material nas construções.

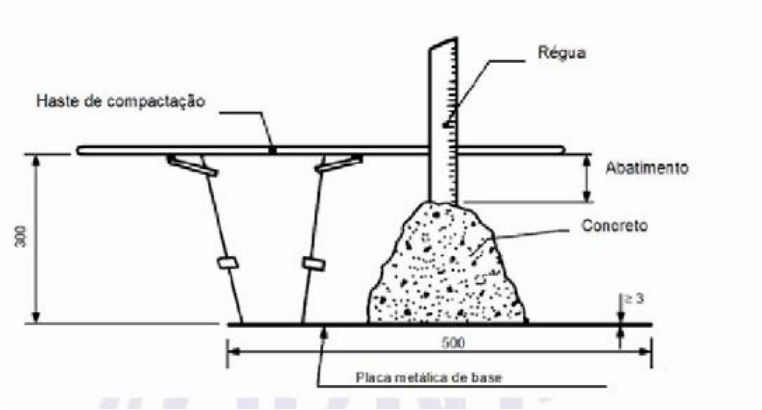
É possível observar a complexidade de definição e determinação de seus valores, principalmente por se tratar de uma propriedade composta, dependendo de pelo menos dois fatores; a fluidez e coesão do concreto, além de estar ligada também aos métodos de lançamento, adensamento e acabamento utilizados em cada tipo de obra, sendo determinada através do ensaio de abatimento de tronco de cone (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

A consistência é o parâmetro utilizado para avaliar a trabalhabilidade do concreto, é uma das principais características para determinar o quão fácil é o seu manuseio, que pode ser definida como sendo a capacidade que o material tem de se deformar sob a ação da sua própria massa, esta propriedade pode sofrer influência dos materiais utilizados e suas proporções (ISAIA, 2010).

De acordo com Sobral (2000) a consistência do concreto pode ser obtida pelos valores de abatimento de tronco de cone, este ensaio é regularizado pela NBR 16889 (ABNT, 2020) Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, usualmente conhecido como *Slump-Test* .

O ensaio é realizado utilizando-se de um tronco de cone com medidas padronizadas, preenchendo-o em três camadas (cada uma com um terço da altura aproximada) adensadas com 25 golpes de haste metálica, e então o cone deve ser retirado e medido o deslocamento vertical da amostra de concreto, conforme Figura 2.1, a medida deve ser expressa em milímetros.

Figura 2.1 - Configuração *Slump-test*



Fonte: NBR 16889 (2020)

Os resultados deste ensaio são utilizados para a classificação do concreto conforme sua consistência, de acordo com a NBR 8953 (ABNT,2015) , são definidas cinco diferentes classes, abrangendo abatimentos entre 10 e 220 milímetros, apresentando as aplicações típicas para cada uma destas.

O abatimento do tronco de cone tem influência diretamente na utilização adequada do concreto produzido, por exemplo, conforme a NBR 8953 (ABNT, 2015), para elementos estruturais nos quais há o lançamento convencional do concreto, é recomendável que este possua um abatimento entre 100 e 160 milímetros.

2.1.4.2 Resistências do Estado Endurecido

O conceito de resistência para o concreto está relacionado fundamentalmente com a tensão necessária para que ocorra a ruptura do material, normalmente avaliada na tração e na compressão.

Existe a crença de que muitas outras propriedades do concreto estão ligadas diretamente a resistência, tais como, módulo de elasticidade, estanqueidade, resistência a intempéries, que podem ser deduzidas utilizando os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial de corpos de prova cilíndricos (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

Ainda que o concreto possua um pequeno comportamento elástico, se tratando de resistências ele pode ser considerado um material frágil, considerando que a ruptura dele ocorre com pequenas deformações totais quando submetido a cargas estáticas, por sua vez, o concreto de alta resistência é mais frágil. Apesar de não existir um método quantitativo que expresse a fragilidade do concreto, na prática, encontra-se entre os tipos frágil e dúctil (NEVILLE, 2016)

2.1.4.2.1 Resistência à compressão

Para o projeto de estruturas utilizando-se de concreto armado, é adotada uma resistência característica para compressão do material, com um nível de confiança de 95%, sendo utilizada como valor de referência para os cálculos de dimensionamento. Para que as estruturas atendam todos os requisitos de segurança, o concreto deve atingir esta resistência especificada, sendo recorrentemente avaliada, demonstrada, e registrada durante o processo de produção do material (ISAIA, 2010).

A resistência à compressão do concreto convencional é influenciada principalmente pela relação água/cimento e pelo adensamento, é notório que ambas estão relacionadas

diretamente com o índice de vazios do concreto, uma vez que, a primeira dita a porosidade da pasta de cimento nos diferentes estágios de hidratação, é visto que quando adensado plenamente a resistência do concreto é inversamente proporcional a relação água/cimento (NEVILLE, 2010).

Ainda segundo Neville (2010), a resistência é influenciada também por fatores relacionados aos agregados, como a forma, textura, tipo utilizado e relação cimento/agregado, além de que, a tensão da qual as fissurações dão início dependem das propriedades dos agregados, apesar da influência da resistência do concreto por estes constituintes ser tratada como secundária, esta não pode ser desprezada.

A classificação de concretos por faixas de resistências é realizada pela NBR 8953 (ABNT,2005), onde basicamente os concretos são divididos nos grupos I e II, onde o primeiro abrange as resistências de 20 até 50 MPa e o segundo de 50 até 100 MPa, a correta classificação é fundamental para a devida aplicação estrutural do material.

A NBR 5739 (ABNT,2018) é responsável pela normalização do ensaio de compressão de corpos cilíndricos de concreto, sendo este um ensaio simples de se executar que consiste na confecção de corpos de prova cilíndricos com a razão da altura e diâmetro inferior a 2,06, e não recomendado ser inferior a 1,94.

Normalmente os moldes utilizados possuem uma altura de 20 cm e diâmetro 10 cm, os corpos de prova moldados são ensaiados em prensa e anotado as cargas de ruptura para determinação da resistência.

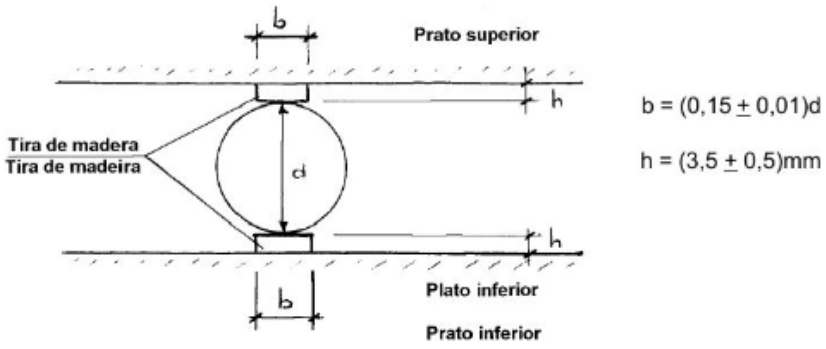
A idade padrão de realização do ensaio é de 28 dias, porém é possível efetuar este ensaio em idades intermediárias ou até maiores, a fim de traçar uma curva de evolução da resistência com o tempo.

2.1.4.2.2 Resistência à tração

Com relação a resistência à tração do concreto, esta normalmente possui valores da ordem de 10% da resistência na compressão, um dos métodos para sua obtenção é o ensaio de compressão diametral de corpos cilíndricos, prescrito pela NBR 5722 (ABNT,2011).

Os corpos de prova são semelhantes aos utilizados na compressão, executa-se o ensaio conforme disposição mostrada na Figura 2.2 abaixo, normalmente realizado aos 28 dias podendo possuir idades intermediárias ou avançadas.

Figura 2.2 - Configuração do ensaio de tração indireta

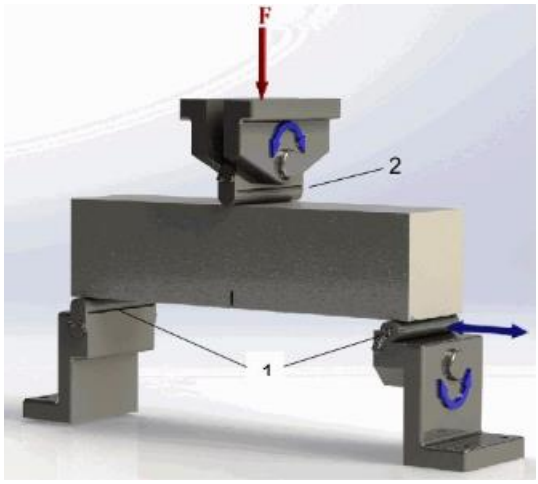


Fonte: NM 8 (1994).

Os valores de resistência à tração do concreto também podem ser obtidos utilizando-se de ensaios de flexão de corpos de prova prismáticos, normalmente associado para concretos contendo fibras.

De acordo com a NBR 16940 (ABNT,2021) este ensaio deve ser realizado com três pontos (um de aplicação de carga e dois apoios), como visto na Figura 2.3 abaixo, sendo “1” os roletes de suporte e “2” rolete de aplicação de carga:

Figura 2.3 - Configuração do ensaio de flexão da NBR 16940



Fonte: NBR 16940 (2021)

2.1.4.3 Absorção de Água

A quantidade de água absorvida pelo concreto está diretamente relacionada à sua porosidade. Portanto, é seguro afirmar que, para alcançar concretos de alta qualidade, é preferível que ocorra a absorção de uma quantidade mínima de água, o que por sua vez, tende a resultar em maiores níveis de resistência.

A porosidade do concreto está diretamente ligada com a existência dos vazios capilares, que representam os espaços não ocupados pelos elementos sólidos na pasta de cimento hidratada. Além disso, esses vazios diminuem à medida que a proporção de água para cimento na mistura é reduzida, e conforme o concreto envelhece e completa seu processo de hidratação. (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

Diversos fatores podem ocasionar um concreto mais poroso, os principais são; a porosidade dos agregados utilizados; água presente na mistura; modificação da zona de contato entre pasta e agregado; fissurações e imperfeições na produção (CAMPITELLI, 1987).

A obtenção tanto da absorção de água quanto do índice de vazios no concreto podem ser obtidos através da obtenção do peso seco, saturado e submerso de corpos de prova cilíndricos, conforme NBR 9778 (ABNT, 2009) Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica; as equações e relações utilizadas para determinação destes parâmetros serão apresentadas posteriormente com maiores detalhes.

2.1.4.4 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade de um dado material é traduzido como sendo a declividade da curva tensão e deformação obtida pela aplicação de uma carga uniaxial.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), considerando o comportamento não linear do concreto é possível a obtenção de três tipos de módulos de elasticidade para este material:

- Módulo tangente: sendo obtido pela reta tangente a qualquer ponto da curva;
- Módulo secante: obtido pela inclinação da reta que liga a origem até o ponto que possui a carga de 30% da carga de ruptura;
- Módulo Cordal: assemelha-se com o método da secante diferenciando-se apenas da origem da reta que é o ponto que representa a deformação longitudinal de 50 µm/m.

É possível notar que esta propriedade é diretamente relacionada com as deformações sofridas pelo material conforme tensões são aplicadas, e por tal, encontra-se presente nos cálculos de dimensionamentos de elementos estruturais.

Quanto maior o módulo consequente maior será a resistência, alguns fatores podem influenciar esta propriedade, como, o tipo e forma dos agregados utilizados, porosidade do concreto produzido, sendo que, o fator mais significativo de influência é a relação água/cimento, estando diretamente ligada também a resistência à compressão do concreto

(PACHECO *et al*; 2014).

A determinação do módulo de elasticidade pode ser realizada através de ensaios estáticos ou dinâmicos, o primeiro tipo determina o módulo através das deformações do concreto com aplicação de uma determinada tensão, ensaios estes, necessariamente destrutivos (POSSAN *et al.*,2020).

Conforme NBR 8522-1 (ABNT, 2021) Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 1: Módulos estáticos à compressão, a determinação do módulo de elasticidade estático pode ser realizada com a obtenção da inclinação da reta tangente, formada pelos pontos de 0,5 MPa e 30% da tensão máxima obtida na curva tensão por deformação específica do concreto. Esta curva sendo obtida através do ensaio de carga axial de corpos de prova cilíndricos.

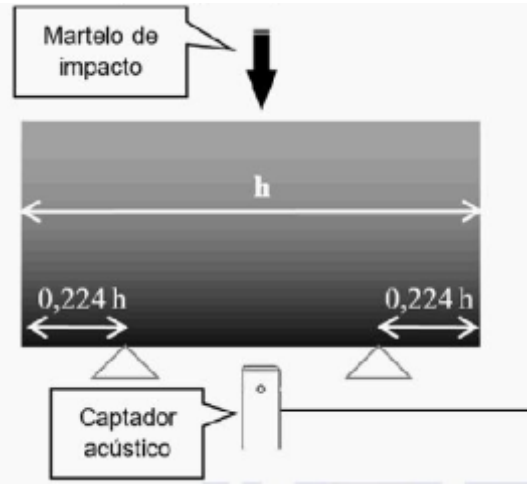
Por conta do comportamento não-linear da curva tensão por deformação do concreto a obtenção do módulo de elasticidade por sua análise pode dificultar a obtenção de apenas um valor para este parâmetro. A utilização de cargas dinâmicas para obtenção do módulo de elasticidade se mostra mais precisa, com os ensaios que envolvem estas cargas sendo não destrutivos, possibilitando a reutilização dos corpos de prova (DIÓGENES *et al.*, 2011).

2.1.4.4.1 Módulo de elasticidade através da frequência natural de vibração do concreto

Conforme prescrito na NBR 8522-2 (ABNT, 2021) Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração, é possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto (Ecd.) através da captação acústica das frequências naturais de vibrações do concreto, sendo geradas por um golpe de martelo de impacto no centro de um corpo de prova cilíndrico de concreto.

As respostas acústicas então são analisadas com auxílio de *softwares* que atendam a norma, com o valor de Ecd obtido no ensaio é possível estabelecer uma relação através do ábaco presente no anexo 1 da NBR 8522-1 (ABNT, 2021) Concreto Endurecido – Determinação do módulo de elasticidade e de deformação – Parte1: Módulos estáticos a compressão; assim determinando o módulo de elasticidade estático do concreto de maneira precisa, a configuração deste ensaio pode ser observada na Figura 2.4 abaixo.

Figura 2.4 - Configuração do ensaio da NBR 8522



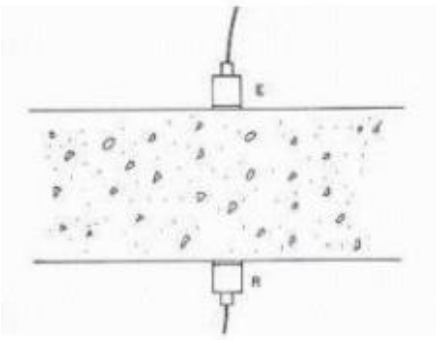
Fonte: NBR 8522-2 (2021)

2.1.4.4.2 Determinação do módulo de elasticidade através da leitura de ondas de ultrassom

A medição do módulo de elasticidade dinâmico do concreto pode ser determinada também através da leitura das velocidades da propagação de ondas de ultrassom geradas por dois transdutores inseridos no corpo de prova cilíndrico de diferentes maneiras.

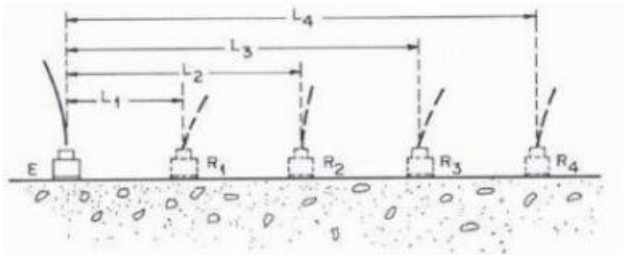
A qualidade do concreto produzido está diretamente ligado com a velocidade de propagação das ondas de ultrassom, deficiências, número de vazios e fissuras, são fatores que influenciam a medição deste parâmetro, este ensaio também consegue averiguar a homogeneidade da mistura, de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019) Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica, a medição pode ser feita utilizando uma das seguintes configurações:

Figura 2.5 - Determinação direta



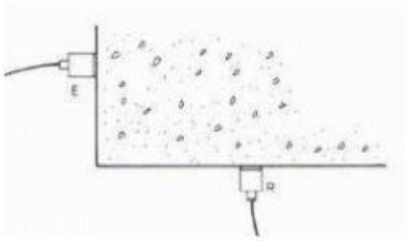
Fonte: Adaptado da NBR 8802 (2019)

Figura 2.6 - Determinação indireta



Fonte: Adaptado da NBR 8802 (2019)

Figura 2.7 - Determinação semidireta



Fonte: Adaptado da NBR 8802 (2019)

2.1.4.5 Durabilidade

Para as estruturas de concreto, a durabilidade está relacionada com o conceito de suportar o processo de deterioração presente no meio em que está inserido, mantendo sua resistência durante um determinado tempo de vida útil esperado. Este conceito não simboliza uma vida útil infinita da estrutura, considerando as variadas situações de carregamentos e exposições ambientais, podem se mostrar necessárias intervenções de reparo e manutenção do concreto para que este continue a atender as expectativas (NEVILLE, 2016).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), toda estrutura de concreto deve conservar sua segurança, estabilidade e aptidão de serviço durante o tempo de vida útil na qual foi concebida, levando em consideração os fatores ambientais presentes nesta época. A norma brasileira também destaca que, para o atendimento desta vida útil é necessário a cooperação de todos envolvidos nas etapas de projeto, construção e utilização da estrutura.

O *American Concrete Institute* (2008), define a durabilidade do concreto como a capacidade de resistir as ações ambientais, ataques químicos, abrasão e todo outro tipo de processo de deterioração que possa a vir ocorrer. Quando o concreto mantem sua forma original, qualidade e capacidade de serviço mesmo sobre estas ações, então, pode ser considerado um concreto durável.

2.1.4.5.1 Efeitos de sulfatos no concreto

Os sais quando em estado sólido não atacam o concreto, este fenômeno ocorre apenas quando estes estão na forma de soluções e quando se alcança um limite na sua concentração de sulfatos, pois neste estado estes reagem com a pasta de cimento hidratada. Os sulfatos normalmente estão presentes nos solos, lençóis freáticos e ambientes marítimos, sendo os mais recorrentes nestes meios os sulfatos de sódio, de potássio e de cálcio (NEVILLE, 2016).

Ainda de acordo com Neville (2016); estes ataques têm como consequência a perda de adesão entre o cimento hidratado e as partículas de agregado, visualmente tem a característica de uma coloração esbranquiçada no concreto.

Os íons de sulfato (SO_4^-) quando em contato com o concreto, podem causar a deterioração do material, pois causam uma sequência de reações entre os constituintes do cimento hidratado com estes.

As diferentes reações que podem ocorrer variam conforme tipo e período de exposição, se dando principalmente de duas formas, simultaneamente ou não, a expansão e fissuração do concreto, e a perda progressiva das propriedades mecânicas de resistência, além do decréscimo da rigidez e massa (FILHO, 1994).

De acordo com Dyer (2014), é possível considerar três principais fatores que corroboram para a resistência do concreto ao ataque de sulfatos, são estes, a permeabilidade do material, concentração dos íons na solução e a composição do cimento utilizado.

Também de acordo com Filho (2014), é possível separar os parâmetros de desenvolvimentos dos ataques de sulfatos no concreto em duas principais, os endógenos, relacionados as características e propriedades dos materiais utilizados, e os ambientais, relacionado principalmente a origem dos sais e ambiente no qual o concreto a de ser exposto.

Com relação a determinação dos parâmetros de durabilidade relacionados aos ataques de sulfatos no concreto, existem diversas metodologias pesquisadas que podem ser empregadas, tais como a imersão de corpos de prova em soluções salinas.

De acordo com Rotta (2022), as metodologias utilizadas diferenciam entre si, principalmente quando se diz respeito as dimensões dos corpos de prova, teores e concentrações das soluções utilizadas e dos ensaios complementares realizados, no geral, estes ensaios têm o objetivo de analisar as variações geométricas dos corpos de prova, do peso e da resistência a compressão, com o tempo de ensaio podendo variar de meses até anos.

2.1.4.5.2 A penetração de íons de cloreto no concreto

Quando estudado a respeito da durabilidade das estruturas de concreto armado, a corrosão das armaduras no interior do concreto é um problema sério, e quando ocorre, todo o desempenho da estrutura pode ser comprometido, não atendendo mais as solicitações das quais foi dimensionada e em alguns casos levando ao colapso do sistema estrutural. A corrosão das armaduras ocorre fundamentalmente pela ação da penetração dos íons de cloreto no interior do concreto (NEVILLE, 2016).

A penetração dos íons de cloreto pode ocorrer das seguintes maneiras, de acordo com HELENE (1993) *apud.* ANDRADE (2001):

- Aceleradores de pega que contenham cloreto de cálcio;
- Através de névoas salinas, conhecidas como maresias;
- Estruturas em meio marítimo;
- Contaminação nos constituintes dos concretos, principalmente cimento e agregados.

O teor de cloretos no concreto, que pode ocasionar a corrosão e dissipação da armadura, pode ser influenciado por diversos fatores, como temperatura do ambiente, umidade relativa do ar, quantidade de alumínio tri cálcio Ca_3A no cimento utilizado e a dosagem realizada do concreto (ALONSO *et al*., 1997).

As normas nacionais e internacionais tratam os teores limites de cloreto com diferentes referências de valores, a NBR 6118 (ABNT, 2014), trata como limite 0,05% da água de amassamento do concreto como restrição ao teor de cloretos incorporados ao concreto, já o *American Concrete Institute* (ACI) costuma tratar os limites de teores em relação a massa de cimento.

Segundo Andrade (2001), existem três maneiras diferentes que os íons de cloreto podem penetrar o concreto:

- Absorção capilar: quanto menor os diâmetros capilares, maior a absorção da água pelo concreto, visto que há a redução da área consequentemente aumento da pressão;
- Migração: com a movimentação dos íons decorrente de um campo elétrico entre duas partes da estrutura, e assim a geração de uma diferença de potencial;
- Difusão: por conta de diferentes concentrações em dois diferentes meios aquosos, com o movimento no sentido de maior concentração para o de menor.

2.1.4.5.3 Determinação dos parâmetros de durabilidade através da resistividade elétrica

Conforme a ASTM G57:1990, a resistividade elétrica de um material indica a habilidade deste em transferir correntes elétricas.

O processo de degradação do concreto está diretamente relacionado com o transporte de íons através da sua microestrutura, a resistência do concreto contra a transferência dos íons carregados é altamente dependente da propriedade conhecida como resistividade elétrica, existe então uma relação entre a deterioração do concreto com a sua resistividade elétrica (AZARSA, GUPTA, 2017).

A resistividade elétrica pode ser utilizada como indicativo de diversas características do concreto, deste o estado fresco até as idades mais avançadas. Quando se dá início ao endurecimento do concreto fresco, a descontinuidade dos espaços entre os poros capilares tem por consequência o aumento da resistividade elétrica do concreto (SENGUL, 2014).

Os materiais cimentícios nas primeiras idades tendem a formação de fissuras, que são como quebras na continuidade da matriz do concreto, estas podem servir como caminho para a entrada de substâncias deteriorantes no concreto, através da resistividade elétrica é possível realizar a leitura das fissuras, auxiliando assim na previsão da durabilidade do concreto a longo prazo (RAJABIPOUR *et al*., 2004).

A medida da resistividade elétrica do concreto baseia na aplicação de uma diferença de potencial entre dois eletrodos posicionados nas duas faces dos corpos de prova, estas sendo opostas e planas, e medindo-se então a corrente resultante. Diversos fatores podem influenciar a resistividade elétrica do concreto, como fator água cimento utilizado, tipo e quantidade dos agregados, adições minerais e aditivos químicos (JESUS, 2018).

Fatores ambientais também influem a resistividade elétrica, o aumento da temperatura proporciona o aumento da mobilidade iônica da água presente nos poros de concreto, diminuindo assim a resistividade elétrica, caso este aumento de temperatura ocasione a evaporação da água livre o efeito oposto pode ser observado (ANDRADE, 2004).

A condutividade elétrica de materiais cimentícios é reduzida de maneira notória quando a umidade relativa também é reduzida, isto foi observado nas pesquisas de Hunkeler (1996), no qual para umidade relativa de 40 % a condutividade elétrica possuiu valores praticamente nulos.

2.2 RESÍDUOS DE USINAGEM – ORIGEM E FORMAÇÃO

O estudo da formação da limalha de aço é a base para se entender todos os processos de usinagem, além de proporcionar o desenvolvimento destes para a utilização de ferramentas mais eficazes e surgimento de novos materiais para serem usinados.

De acordo com Machado *et al.* (2009), sabe-se que os resíduos são gerados em altas velocidades de deformação e posterior ruptura do material da peça, a formação destes elementos possui 4 etapas principais sendo:

- Recalque inicial: após a penetração da cunha no material usinado, uma parcela pequena deste é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta;

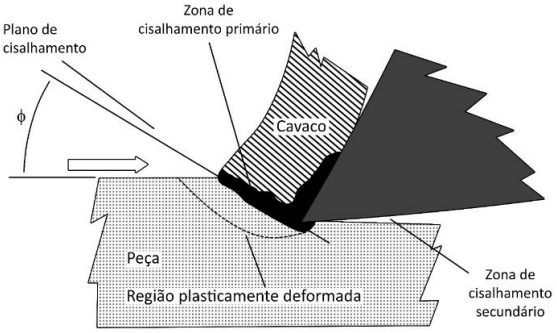
- Deformação e ruptura: A parcela pressionada possui de início uma deformação elástica seguida por uma deformação plástica, que com o aumento progressivo desta ocasiona a ruptura, sendo esta normalmente dada por cisalhamento, após esta ruptura há a propagação de uma trinca seguindo critérios do material usinado, como todo este processo ocorre de maneira dinâmica, existem planos de ruptura e propagação de trincas que se dão de maneira instantânea, estes são chamados de "plano primário de cisalhamento" e definem a região entre a peça e o resíduo;

- Deslizamento das lamelas: Na região de cisalhamento haverá a ruptura total ou parcial, conforme há a continuação da penetração da ferramenta na peça, as propriedades do material, juntamente com as condições de avanço determinam a quantidade de material unido às limalhas de aço, originando assim resíduos contínuos ou descontínuos;

- Saída da limalha de aço: Ocorre ao final destes processos o escorregamento do material deformado e rompido (o resíduo) sobre a área de saída da ferramenta, enquanto uma nova lamela surge que passara pelos mesmos processos, repetindo desta forma mais uma vez todas as etapas.

A Figura 2.8 abaixo ilustra a formação destes resíduos:

Figura 2.8 - Formação de limalhas metálicas



Fonte: Adaptado de MACHADO *et al.* (2009)

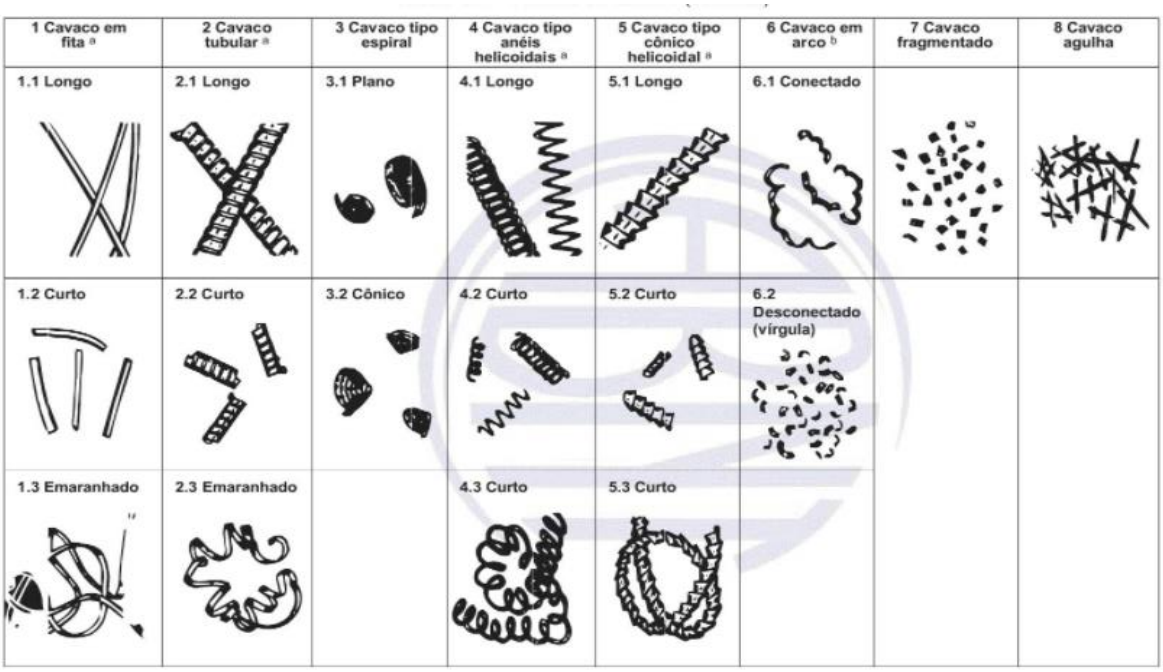
2.2.4 Caracterização e classificação

De acordo com o prescrito por Machado *et al.* (2009), uma das classificações usuais para os resíduos de usinagem é que leva em consideração a morfologia, dividido em três diferentes tipos, sendo estes, os contínuos, descontínuos e segmentados.

É notório observar que a caracterização do material está diretamente ligada com o processo utilizado e as matérias primas, uma vez que estas, influem diretamente na forma final dos resíduos, que são comumente, em fita, helicoidais, em espiral e em lascas e pedaços (Machado *et al*., 2009).

A classificação normativa dos resíduos consta na NBR ISO 3685 (ABNT, 2017), e ela é mostrada na Figura 2.9 abaixo, vale notar que esta leva como principal consideração a forma do material para classificá-lo, sendo possível assim com esta informação, determinar os materiais utilizados e processos adotados durante a usinagem.

Figura 2.9 - Classificação dos resíduos conforme ISO 3685:2017



Fonte: ABNT NBR ISO 3685 (2017).

2.2.5 Reciclagem do resíduo

Em 2019 a produção de aço alcançou o valor de 1869,9 milhões de toneladas, um aumento de aproximadamente 3,4% se comparado com o ano anterior (*Word Steel Association*,

2020), considerando que a limalha compreende de 3% a 5% do peso de fundição do aço, a geração de resíduos metálicos dos mais diferentes tipos apresenta cada vez mais uma crescente, devido principalmente ao aumento dos índices de industrialização global.

Cada país tende a lidar com o problema desta geração de acordo com a política vigente, mas de maneira geral busca-se sempre a reciclagem, no caso da reciclagem convencional é necessário a limpeza do resíduo e fundição do material, o que ocasiona despesas adicionais e elevado consumo energético, sendo interessante formas alternativas de reciclagem deste material, como a inserção do mesmo no concreto (Kavaliauskiene *et al.*, 2019).

No Brasil de acordo com a NBR 10004 (ABNT,2004), as limalhas de aço são consideradas um tipo de resíduo sólido, de tal maneira, para este material se aplica diretamente o prescrito na lei n.°12.305/2010, da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

O gerenciamento destes resíduos é definido então como sendo: “conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (Inciso X, art. 3°).

2.2.5.2 Utilização Como Constituinte no Concreto

A inserção da limalha de aço como parte no concreto vem sendo pesquisado mundo a fora, não apenas por questões ambientais, também são observados aumentos significativos nas resistências do estado endurecido, melhorias em características térmicas e auxílio no controle de fissuração.

Visto a grande variabilidade de formas e tamanhos que este material pode ser encontrado, existe também, uma certa diversidade na utilização deste material no concreto, podendo atuar como fibras, substituição de agregado, adição ao concreto e até substituição a parte de cimento.

A tabela 2.2 abaixo apresenta pesquisas que utilizaram resíduos de usinagem no concreto, mostrando os principais resultados obtidos quanto as propriedades analisadas, com algumas destas sendo abordadas com maiores detalhes em seguida.

Tabela 2.2 – Exemplos de pesquisas utilizando limalha de aço no concreto.

Pesquisa	Resultados
KESSHAVARZ, Z.; MOSTOFINEJAD, D. **Steel chip and porcelain ceramic wastes used as replacements for coarse aggreegates in concrete**. Journal os Cleaner Production vol. 230. 2019.	Aumento da resistência à compressão, tração e tração na flexão;
MALEK, M.; KADELA, M.; TERPILOWSKI, M.; SZEWCZYK, T.; LASICA, W.; MUZOLF, P. **Effect of Metal Lathe Waste Addition on the Mechanical and Thermal Properties of Concrete.** MATERIALS. 2021.	Diminuição da densidade; Aumento da resistência à compressão, tração e tração na flexão; Aumento no módulo de elasticidade. Diminuição da difusidade térmica do concreto
MAANVIT, P. S.; PRASAD, B. P.; VARDHAN, M. H.; JAGARAPU, D. C. K.; ELURU, A. **Experimental Examination of Fiber Reinforced Concrete Incorporation with Lathe Steel Scrap.** International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. Volume 9, dezembro de 2019.	Aumento da resistência à compressão, tração e tração na flexão; Aumento no módulo de elasticidade.
HOSEN, A.; ALTHOEY F. **Physical and Mechanical Characteristics of Sustainable Concrete Comprising Industrial Waste Materials as a Replacement of Conventional Aggregate.** Sustainability. 2021.	Aumento da resistência à compressão, tração e tração na flexão; Aumento pouco significativo na densidade do concreto;
PUROHIT, R.; DULAWAT, S.; AHMAD, E. **TO ENHANCE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE BY USING LATHE STEEL SCRAP AS REINFORCED MATERIAL.** Journal of Engineering Science. Volume 11. Junho de 2020	Aumento da resistência à compressão, tração e tração na flexão;
ÇELIC, A. I.; OZKILIÇ, Y.O.; ZEYBEK, O.; OZDONER, N.; TAYEH, B.A. **Perfomance Assessment Fiber-Reinforced Concrete Product with Waste Lathe Fibers**. Sustainability. 20 de setembro de 2022.	Aumento da resistência à compressão e tração na flexão; Estudo de microscopia demonstrando boa aderência do resíduo ao concreto

Fonte: Autor(2023)

De acordo com o pesquisado por Mostofinejad e Kesshavarz (2019), foi utilizado este material para substituir o agregado graúdo, utilizando as proporções de substituição com relação ao volume de concreto sendo estes valores de 1%, 1,25% e 1,5%, em comparação com o traço base.

Foi observado um incremento da resistência a compressão e tração em 12,8% e 21% respectivamente, e para a tração na flexão houve um aumento significativo de 64,7%, foi avaliada também a absorção de água pelo concreto, onde a inserção do resíduo aumentou os valores desse parâmetro em aproximadamente 30% para todos os teores de incorporação, o tipo de resíduo utilizado pelos pesquisadores é mostrado na Figura 2.10 abaixo:

Figura 2.10 - Resíduos utilizados por Mostofinejad e Kesshavarz

Fonte: Mostofinejad, Kesshavarz(2019)

Outra pesquisa de interesse é a de Malek *et al.* (2021) que utilizou o resíduo de aço no concreto sem a realização da limpeza do óleo e lubrificante, substituindo o agregado miúdo, utilizando as proporções de substituições em relação ao peso de cimento de 5%, 10% e 15%, onde conforme o incremento dos teores reduzia-se também a trabalhabilidade da mistura de concreto.

Também foi observado nos resultados que a densidade do concreto diminuía enquanto as propriedades mecânicas aumentavam, com aumentos de até, 36,3% para a compressão, 18,2% para a flexão e 38,4% para a tração, além do módulo de elasticidade do concreto que teve um aumento de até 6,25%.

As propriedades térmicas foram também avaliadas, nas quais observou-se que, a difusividade térmica da mistura foi reduzida e a capacidade calorifica específica foi aumentada, por fim observa o tipo de resíduo utilizado pelos autores na Figura 2.11 abaixo:

Figura 2.11 - Resíduos utilizados por Malek *et al.*

Fonte: Malek *et al.* (2021)

Outra relevante pesquisa a respeito do tema é a desenvolvida por Althoey e Hosen (2021), que utilizou o resíduo de torno em substituição ao agregado no concreto, nas proporções de 5% 10%, 15% e 20% em relação ao peso do agregado, conforme aumento dos teores de substituições houve a redução dos valores de abatimento do tronco de cone, demonstrando que, conforme maior o teor, maior a redução da trabalhabilidade da mistura.

Nesta pesquisa houve o acréscimo em todas as resistências mecânicas do concreto, também foi realizado o ensaio UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) que possui intuito de avaliar a qualidade do concreto, em que os concretos possuindo a proporção de 5% aos 28 dias mantiveram a faixa ótima, observando também que conforme o incremento da proporção de resíduos aumentava também o UPV encontrado, os resíduos utilizados são mostrados abaixo na Figura 2.12:

Figura 2.12 - Resíduos utilizados por Althoey e Hosen

Fonte: Althoey, Hosen (2021)

Por fim, uma das pesquisas que também se mostrou relevante foi a realizada por Çelik *et al.* (2022), que estudou o comportamento dos resíduos como fibra no concreto, utilizando teores de fibras de 0%, 1%, 2% e 3% em relação ao volume de concreto.

Observou-se que, conforme o incremento de resíduos houve uma consequente perda de trabalhabilidade, porém, um acréscimo da resistência a compressão (entre 9% até 32%), e de tração na flexão, além de auxiliar no controle de fissuração do concreto, como esperado para fibras, também foi realizado um estudo de microscopia onde foi observado uma boa aderência do resíduo com o concreto, a Figura 2.13 mostra o resíduo utilizado na pesquisa:

Figura 2.13 - Resíduos utilizados por Çelic *et al.*

Fonte: Çelic *et al.* (2022)

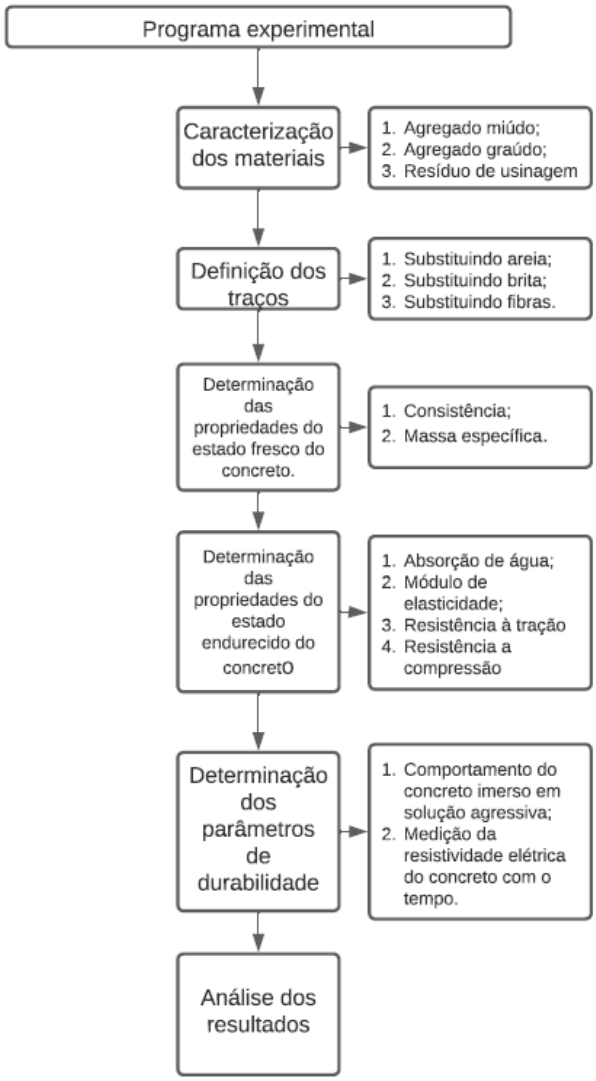
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este trabalho tem por premissa a análise dos impactos que a inserção dos resíduos de usinagem ocasiona no concreto, tanto para seu estado fresco quanto para seu estado endurecido, sendo realizada a análise de 3 substituições, a primeira sendo o agregado miúdo, a segunda o agregado graúdo e por fim, substituindo fibras no concreto.

O diagrama representado na figura 3.1 tem o intuito de demonstrar o programa experimental utilizado.

Figura 3.1 – Programa experimental



Fonte: Autor (2023)

Foram definidos parâmetros a serem utilizados, tendo como embasamento pesquisas e artigos citados anteriormente sobre o assunto, estes são descritos a seguir:

- Fator água/cimento: relação estabelecida de 0,5;
- Idade de ensaios de resistência: 28 dias e 91 dias para os corpos de prova cilíndricos;
- Tipo de cura: Realizada em câmara úmida, seguindo as diretrizes prescritas na NBR 5738 (ABNT, 2015);
- Teores de incorporação: Para os traços que visam a substituição dos agregados graúdos e miúdos, calcula-se 5%, 10% e 15% do peso de cimento para o traço, e estes valores, foram utilizados como sendo as quantidades de incorporação de limalha de aço na mistura e consequentemente como os de redução do respectivo agregado.
- Para a situação que visa substituir as fibras, utiliza-se um traço base de concreto reforçado com fibras de aço, e do total de fibras utilizadas são substituídas 25% e 50% destas pelos resíduos, sendo estes os teores utilizados para este caso.
- Tipo de cimento: O cimento possui as características, limites e orientações prescritas na NBR 16697 (ABNT, 2018) Cimento Portland – Requisitos; que serão atendidos, e o tipo de cimento utilizado é o CPV-ARI.

A quantificação dos corpos de prova utilizados para cada ensaio é mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Quantitativo de corpos de prova cilíndricos

Corpos de Prova utilizados por ensaio - CILÍNDRICOS								
TRAÇO	COMPONENTE SUBSTITUIDO	TEOR DE SUBSTITUIÇÃO	COMPRESSÃO	ABSORÇÃO DE ÁGUA	MÓDULO DE ELASTICIDADE ULTRASSOM E SONELASTIC	DURABILIDADE POR IMERSÃO	DURABILIDADE POR RESISTIVIDADE ELÉTRICA	TRAÇÃO INDIRETA
REF	-	0%	12	6	6	6	2	6
5A	AREIA	5%	12	6	6	6	2	6
10A	AREIA	10%	12	6	6	6	2	6
15A	AREIA	15%	12	6	6	6	2	6
5B	BRITA	5%	12	6	6	6	2	6
10B	BRITA	10%	12	6	6	6	2	6
15B	BRITA	15%	12	6	6	6	2	6
CRF	-	0%	12	6	6	6	2	6
25F	FIBRA	25%	12	6	6	6	2	6
50F	FIBRA	50%	12	6	6	6	2	6

Fonte: Autor (2023)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos materiais é de suma importância para o maior entendimento do concreto produzido, previsões de comportamento, e para futuras reproduções da pesquisa, os

materiais a serem caracterizados por este trabalho são os agregados e o resíduo utilizado, vale notar que não foi caracterizado o cimento, uma vez que, as principais informações para este material já são fornecidas pelos fabricantes.

3.2.1 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi o presente na instituição de ensino superior de realização da pesquisa, foram obtidos os seguintes parâmetros; curva granulométrica e massa específica, utilizando como base as seguintes referências normativas:

- NM 52:2002 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente;
- NM 248:2001 – Agregados – Determinação da composição granulométrica.

3.2.2 Agregado Graúdo

Para o agregado graúdo foi utilizado também o presente na instituição de ensino superior , para sua caracterização foram determinadas as seguintes propriedades; determinação da composição granulométrica e massa específica, seguindo as referências normativas:

- NM 53:2009: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- NM 248:2001 – Agregados – Determinação da composição granulométrica.

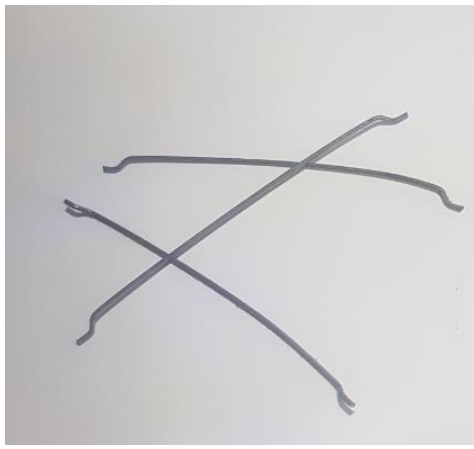
3.2.3 Resíduo de Usinagem e fibras comerciais

Os resíduos de usinagem foram obtidos através de laboratórios de engenharia mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná e tornearias das cidades de Guarapuava-PR, classificados por sua forma de acordo com a ISO 3685:2017.

Também foram executadas medições nos comprimentos com auxílio de paquímetro eletrônico de uma certa amostragem para determinação de valores característicos para suas dimensões e determinação de sua massa unitária.

O modelo de fibras utilizados são do tipo 3D com 60 cm de comprimento, conforme Figura 3.2 Abaixo.

Figura 3.2 – Fibras de aço utilizadas



Fonte: Autor (2023)

3.3 DOSAGEM DO CONCRETO

Para o traço de concreto convencional e os de incorporação de resíduo como substituição aos agregados, foi utilizado como base o desenvolvido por Camargo (2020), que, realizou um estudo otimizando os traços de concreto estruturais a fim de se obter 30 MPa de resistência, com fator água cimento de 0,5.

Para o traço de concreto com fibras, foi utilizado de referência Figueiredo (2000), com uma resistência de 40 MPa, teor de fibras de 40 kg/m³ e uma relação de água e cimento também de 0,5.

A composição unitária dos traços em massa pode ser observada na Tabela 3.2 abaixo:

Tabela 3.2 – Composição unitário dos traços

Composição unitária dos traços							
Traço		Fator a/c	Cimento (Kg)	Resíduos (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)	Fibras de aço (Kg)
REF	0%	0,5	1,000	0,000	1,960	2,720	0,000
5A	5%	0,5	1,000	0,050	1,910	2,720	0,000
10A	10%	0,5	1,000	0,100	1,860	2,720	0,000
15A	15%	0,5	1,000	0,150	1,810	2,720	0,000
5B	5%	0,5	1,000	0,050	1,960	2,670	0,000
10B	10%	0,5	1,000	0,100	1,960	2,620	0,000
15B	15%	0,5	1,000	0,150	1,960	2,570	0,000
CRF	0%	0,5	1,000	0,000	1,770	2,550	0,095
25F	25%	0,5	1,000	0,024	1,770	2,550	0,071
50F	50%	0,5	1,000	0,048	1,770	2,550	0,048

Fonte: Autor (2023)

3.4 PROCESSO DE MISTURA E CURA

Para o processo de mistura foi utilizado de betoneira, a ordem dos procedimentos foi:

- Agregado Graúdo e Resíduos;
- Um terço da água;
- Cimento;
- Um terço da água;
- Agregado miúdo;
- Um terço da água;
- Correções de traço.

O processo de cura utilizado foi o de câmara úmida, que atende a todos os requisitos e orientações prescritos na NBR 5738 (ABNT, 2015) “Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova”.

3.5 PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO

3.5.1 Determinação da consistência pelo ensaio de abatimento de tronco de cone

O ensaio de abatimento de cone ou *Slump-Test* é amplamente difundido e aceito como ensaio para obtenção da consistência do concreto, sendo este o utilizado, regido pela norma NBR 16889 (ABNT, 2020), o ensaio pode ser observado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Configuração típica do *Slump Test*

Fonte: Autor (2023)

3.5.2 Determinação da massa específica

A massa específica para o concreto é calculada utilizando-se o volume ocupado pela massa compactada de concreto, onde este é também o volume dos moldes utilizados pelos corpos de prova confeccionados, assim sendo, a massa específica é expressa pela equação 3.1 abaixo:

$$\mu = \frac{m}{v} \tag{3.1}$$

em que: μ = massa específica (g/cm³);

m = massa do concreto adensado (g);

v = volume ocupado (cm³).

3.6 PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO

3.6.1 Determinação da absorção de água

Para a determinação da absorção de água pelo concreto foi utilizada a NBR 9778 (ABNT 2009), realizando o ensaio em 6 corpos de prova para cada traço.

Para realização do ensaio inicialmente foram pesados os corpos de prova e colocados em estufa pelo período de 72 horas, conforme Figura 3.4, após este procedimento são resfriados a temperatura ambiente e realizado as medições da massa.

Figura 3.4 – Corpos de prova em estufa

Fonte: Autor (2023)

Em seguida são imersos em um tanque com água onde a temperatura se mantem aproximadamente em 23 °C no período de 72 horas e realizadas as pesagens novamente, conforme mostrado na Figura 3.5:

Figura 3.5 – Corpos de prova submersos

Fonte: Autor (2023)

Então são fervidos com auxílio de fogareiro industrial por 5 horas, aguardadas 19 horas para realização de novas pesagens, após este procedimento é realizada a última pesagem dos corpos de prova, onde é realizada com estes imersos em água com auxílio de cesto de arame.

A absorção de água é dada então pela equação 3.2 abaixo:

$$A = \left(\frac{M_{SAT} - M_S}{M_S}\right) . 100 \qquad (3.2)$$

em que: A = absorção de água por imersão (%);

M_{SAT} = massa dos corpos de prova saturados (g);

M_S = massa seca (g).

Também é possível determinar os índices de vazios com a equação 3.3:

$$I_v = \left(\frac{M_{SAT} - M_S}{M_{SAT} - M_{im}}\right) . 100 \qquad (3.3)$$

em que: I_v = Índice de vazios (%);

M_{SAT} = massa dos corpos de prova saturados (g);

M_S = massa seca (g);

M_{im} = massa imersa (g).

Por fim, determina-se então as massas específicas seca, saturada e real de acordo com as seguintes equações:

$$\rho = (\frac{M_s}{M_{SAT} - M_{im}}) \quad (3.4)$$

$$\rho_s = (\frac{M_{SAT}}{M_{SAT} - M_{im}}) \quad (3.5)$$

$$\rho_r = (\frac{M_s}{M_S - M_{im}}) \quad (3.6)$$

em que: ρ = massa específica;

ρ_s = massa específica saturada;

ρ_r = massa específica real;

M_{SAT} = massa dos corpos de prova saturados (g);

M_S = massa seca (g);

M_{im} = massa imersa (g).

3.6.2 Determinação das Resistências

3.6.2.1 Resistência a compressão

Para determinação da resistência a compressão foi utilizado como base a NBR 5739 (ABNT, 2018) Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga axial constante à taxa de 0,45 MPa com no máximo 0,15 MPa de variação, cessada quando houver uma queda abrupta no carregamento, indicando assim o rompimento dos corpos de prova.

Os corpos de prova utilizados para este ensaio possuem aproximadamente 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, respeitando as tolerâncias mínimas, não necessitando assim a aplicação de fatores de correção para os cálculos.

O ensaio foi realizado em 12 corpos de prova para cada traço nas idades de 28 e 91 dias, sendo 6 corpos de prova por idade.

A determinação da resistência à compressão do concreto é dada pela equação abaixo:

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.D} \quad (3.7)$$

em que: f_c = resistência à compressão do concreto (MPa);

F = força máxima alcançada (N);

D = diâmetro do corpo de prova (mm).

Também foram medidos os deslocamentos verticais dos corpos de prova utilizando-se de célula de carga juntamente com um medidor de deslocamento, o ensaio foi realizado conforme demonstrado na figura 3.6 abaixo:

Figura 3.6 – Configuração do ensaio de compressão

Fonte: Autor (2023)

3.6.2.2 Resistência a tração por compressão diametral

A determinação da resistência à tração dos traços foi realizada de maneira indireta utilizando a NBR 7222 (ABNT,2011) Concretos e argamassas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

O ensaio é realizado aplicando-se a carga de maneira constante diametralmente em corpos de prova cilíndrico, que possuem as mesmas dimensões dos utilizados para determinação da resistência a compressão.

Foram utilizados 6 corpos de prova de cada traço neste ensaio, realizado aos 28 dias, a

resistência a tração é dada pela equação 3.8:

$$f_{ct,sp} = \frac{2.F}{\pi.d.l} \quad (3.8)$$

em que: $f_{ct,sp}$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = força máxima obtida no ensaio (N);

d = diâmetro do corpo de prova (mm);

l = ao comprimento do corpo de prova (mm).

3.6.3 Determinação do módulo de elasticidade

Com a obtenção da curva tensão por deformação específica no ensaio de compressão dos corpos de prova cilíndricos, foi calculado o módulo de elasticidade estático dos 6 corpos de prova ensaiados, através da obtenção da reta tangente formada pelos pontos de tensão de 0,5 MPa até a tensão equivalente a 30% da carga máxima de resistência à compressão registrada do concreto, vale salientar que, com o equipamento utilizado não foi possível a obtenção de valores e curvas coerentes para os traços possuintes de fibras de aço, sendo descartados todos os valores de módulo estático dos traços “CRF”, “25F” e “50F”.

Para se encontrar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto se utilizam de ensaios não destrutivos, sendo utilizado duas metodologias diferentes, a primeira através da leitura da frequência natural de vibração emitida pelos corpos de prova, com base a NBR 8522-2 (ABNT, 2021) Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração, e auxílio do software denominado *Sonelastic.*

O segundo método utilizado é através do ensaio da leitura da velocidade de propagação de ondas de ultrassom do concreto, conforme a NBR 8802 (ABNT, 2019) Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

Ao contrário dos ensaios que visam a determinação do módulo de elasticidade através da deformação do concreto (ensaios estáticos), ambos os ensaios realizados são métodos dinâmicos não destrutivos, as cargas aplicadas são dinâmicas e os corpos de prova podem ser reutilizados após o ensaio para determinação de resistências ou para leituras em idades mais avançadas.

3.6.3.1 Módulo de elasticidade dinâmico com *Sonelastic*

No método utilizando o *Sonelastic* é necessário o conhecimento de dados geométricos dos corpos de prova e sua respectiva massa, com o posicionamento do equipamento à 0,224 L (L sendo o comprimento total de cada corpo de prova), um microfone deve ser posicionado a distância de 2 cm da extremidade, sendo utilizado para a captação das leituras de frequência emitidas por uma leve batida de um pulsador manual.

Os dados são repassados ao *Software Sonelastic*, que por sua vez, realiza todos os cálculos e expressa os resultados obtidos através de uma planilha eletrônica gerada.

Foram utilizados 3 corpos de prova de cada traço para este ensaio, sendo o módulo de cada amostra o valor médio obtido em 6 medições, a configuração de realização do ensaio se deu conforme a Figura 3.7 abaixo:

Figura 3.7 – Ensaio utilizando *Sonelastic*

Fonte: Autor (2023)

3.6.3.2 Velocidade de propagação de onda de ultrassom

Para a determinação do módulo de elasticidade de acordo NBR 8802 (ABNT, 2019), utiliza-se equipamento adequado para a leitura da propagação de ondas de ultrassom geradas por dois transdutores calibrados antes do ensaio.

A superfície de contado com o concreto é revestida por um gel, garantindo assim maior eficiência na transmissão das ondas de ultrassom.

Para este ensaio foram utilizados 6 corpos de prova por traço, sendo executada a medida na posição direta de acordo com a Figura 3.8.

Figura 3.8 – Ensaio utilizando ultrassom em posição direta

Fonte: Autor (2023)

3.6.4 Ensaio de imersão de corpos de prova em solução salina agressiva

Os ensaios realizados com corpos de prova sendo imersos em soluções salinas tem como principal função o estudo do desempenho do concreto produzido frente a deterioração.

As etapas podem ser resumidas como sendo, a imersão de corpos de prova cilíndricos de concreto em solução salina por um determinado tempo, e após a retirada destes, são realizadas as medições dos parâmetros geométricos, da resistência quanto a compressão, do módulo de elasticidade e do peso dos corpos de prova.

Há a falta de ensaios padronizados para determinar o desempenho do concreto imerso em soluções salinas, sendo assim foram realizados ensaios seguindo as recomendações e procedimentos das pesquisas de Zhao *et al.* (2020a), Zhao *et al.* (2020b) e Zhao *et al.* (2018), além da utilização da metodologia para testar a resistência química do concreto em soluções agressivas da norma japonesa JSTM C7401 (1999).

Os procedimentos se deram início com a cura dos corpos de prova em câmara úmida, retirados aos 28 dias e imersos sem impermeabilização em três diferentes soluções salinas, a de 5% de sulfato de sódio, de 10 % de sulfato de sódio e de 5% de sulfato de sódio com mais 3% de cloreto de sódio; por 180 dias, a posição dos corpos de prova foi alterada a cada duas semanas para aumento da exposição e solução trocada a cada 45 dias.

A figura 3.9 exemplifica a disposição dos corpos de prova em uma das soluções salinas.

Figura 3.9 – Corpos de prova imersos na solução salina

Fonte: Autor (2023)

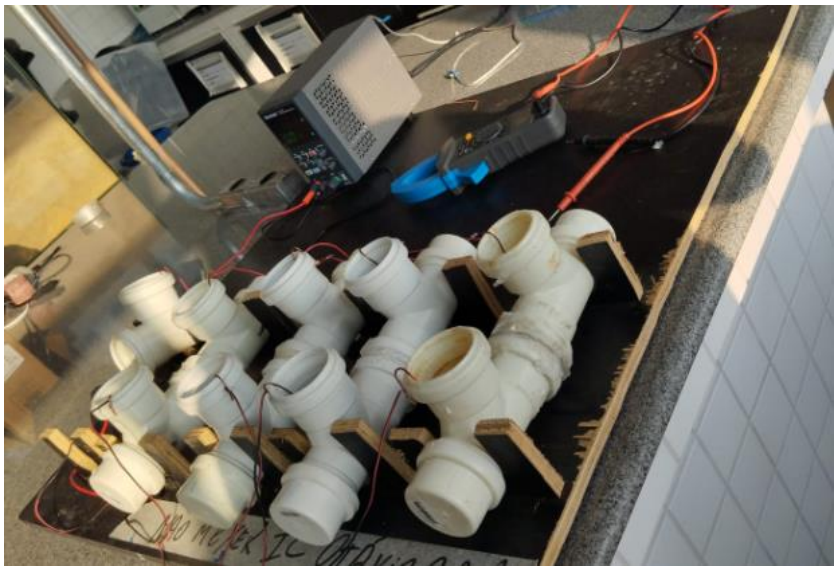
Ao fim do tempo de ensaio foi realizada a comparação das dimensões dos corpos de prova antes da imersão e ao final, com a determinação dos módulos de elasticidade, resistência a compressão, alteração nas dimensões e do peso.

Foram utilizados para este ensaio 6 corpos de prova por traço, sendo 2 em cada solução, além destes, foram colocados mais 2 de cada traço em câmara úmida durante os 180 dias, para a realização da comparação da resistência à compressão do concreto entre os que foram imersos com os que sofreram cura convencional durante o mesmo período.

3.6.5 Ensaio de resistividade elétrica

O sistema para o ensaio da resistividade elétrica é demonstrado na Figura 3.10, ele é composto por uma fonte da qual provem energia para o sistema (12V), que, passa por um circuito em paralelo formado por 5 corpos de prova, com auxílio de um voltímetro são realizadas medições a cada pelo menos 12 horas.

Figura 3.10 – Configuração do ensaio de resistividade elétrica



Fonte: Autor (2023)

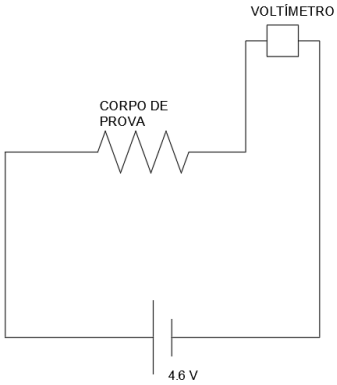
Para o ensaio foram utilizados corpos de prova de 5cm de diâmetro e 10cm de altura, que são inseridos em um reservatório feito de tubos PVC, em uma das extremidades é utilizada uma solução contendo 1 mol de cloreto de sódio diluído em água, e na outra água destilada.

Para as leituras são inseridos eletrodos em cada extremidade do reservatório, no contendo a solução de cloreto de sódio o positivo e na água destilada então recebendo os íons de descarga, fechando assim um circuito no qual a corrente e a voltagem são registradas.

As leituras são realizada por voltímetro pelo menos 3 vezes ao dia, sendo encerradas quando os valores medidos seguidamente demonstram pouca variação, com estes dados é possível a obtenção da curva de resistividade elétrica com o tempo.

Além disso o sistema é composto por medidores de temperatura e umidade do ar, visto que estas condições tendem a influenciar diretamente nas leituras. O circuito elétrico simplificado é demonstrada na Figura 3.11:

Figura 3.11 – Representação do circuito do ensaio de resistividade elétrica



Fonte: Autor (2023)

3.7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA E APROXIMAÇÕES NÃO LINEARES

Para os resultados obtidos foi realizada a análise de variância (ANOVA), uma análise estatística de comparação de médias de grupos de amostra diferentes, determinando se a diferença destes valores é estatisticamente significativa, e se forem, qual o nível de confiabilidade com que se pode afirmar que são de fato amostragens diferentes

Validando os dados obtidos e atrelando um determinado grau de confiança para cada resultado a ser discutido.

Foram realizadas para diversos resultados aproximações não lineares, sendo informado sempre o fator R^2, este quando mais próximo de 1,0 melhor é a representação do comportamento dos resultados dentro do intervalo de analiso, sendo que valores superiores a 0,80 são consideradas aproximações adequadas.

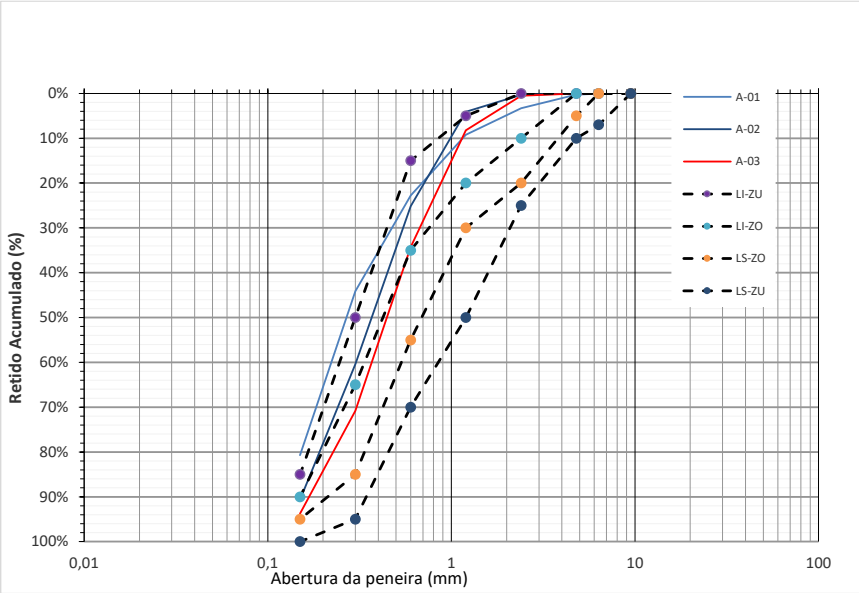
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS

Para o agregado miúdo foi utilizado areia natural média, sendo analisadas inicialmente 3 tipos diferentes amostras “A-01”, “A-02” e “A-03”, sendo definida para utilização aquela no qual mais se enquadrava nos limites normativos, com relação a zona ótima e utilizável, sendo escolhida a amostra de areia “A-03”.

A curva granulométrica das areias disponíveis está representada na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos

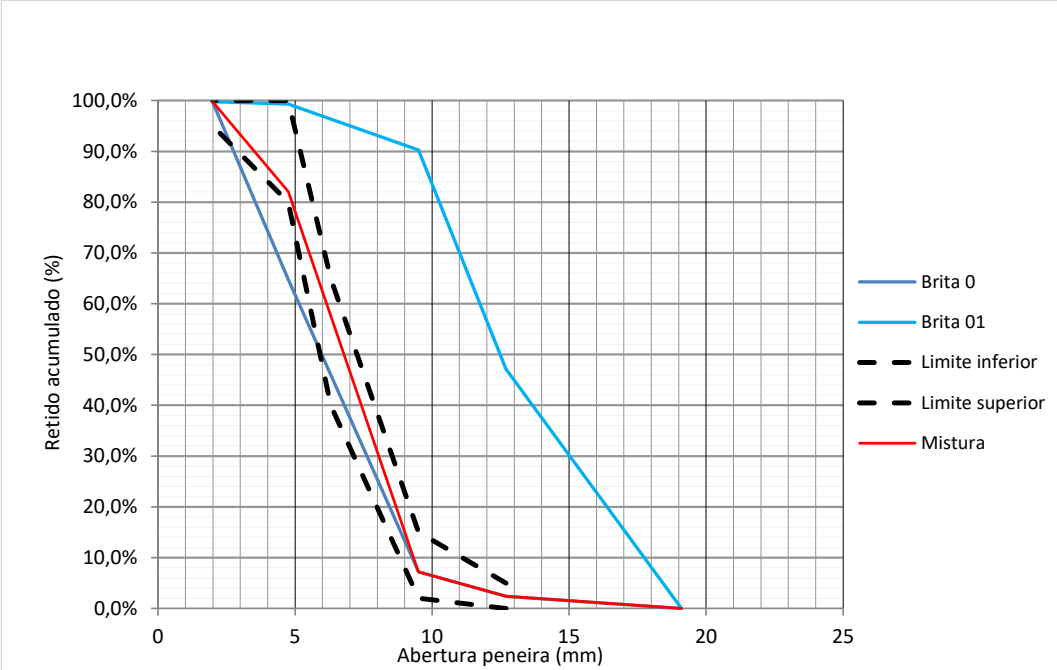


Fonte: Autor (2023)

Para o agregado graúdo seguiu-se com os mesmos preceitos do agregado miúdo, as curvas granulométricas são representadas na Figura 4.2.

De acordo com os resultados foi adotado a mistura de brita 00 e brita 01, nas proporções adequadas.

Figura 4.2 – Granulometria dos agregados graúdos



Fonte: Autor (2023)

Com relação ao resíduo utilizado, com base na classificação da ISO 3685:2017, para as substituições foi utilizado os tipos “6.2 limalhas de aço em arco desconectado”, conforme Figura 4.3.

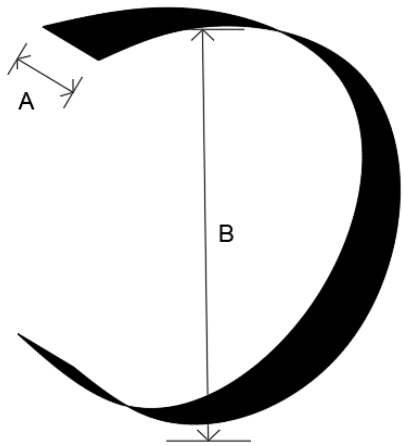
Figura 4.3 – Resíduos utilizados

Fonte: Autor (2023)

Foram realizadas medições de duas dimensões diferentes em 10 amostras de limalha de aço com auxílio de paquímetro, a primeira medição está relacionada ao diâmetro de arco do resíduo e a segunda com a largura do mesmo, conforme figura 4.4, a forma utilizada para a

confecção dos corpos de prova foi majoritariamente 6.2 (conforme Figura 2.9), de arco desconecta, formato este que se assemelha em partes com agregados.

Figura 4.4 – Resíduos utilizados – Dimensões aferidas



Fonte: Autor (2023)

Os valores obtidos nas medições estão contidos na Tabela 4.1 abaixo, é notório que a maior variabilidade do resíduo é o seu diâmetro, com diferença do valor máximo para o mínimo de 6 milímetros.

Tabela 4.1 – Resíduos utilizados – Dimensões aferidas

Amostra	Med. A (mm)	Med. B (mm)
1	4,00	11,70
2	4,30	8,70
3	4,65	9,10
4	4,60	11,90
5	4,40	9,10
6	4,40	5,65
7	4,65	7,80
8	4,55	11,50
9	4,50	8,95
10	4,30	9,00
Média	4,44	9,34
Desvio Padrão	0,16	1,42

Fonte: Autor (2023)

Foi averiguada também a massa unitária dos agregados e dos resíduos, conforme o método C da NBR 16972(ABNT, 2021) Agregados - Determinação da massa unitária e do

índice de vazios, os valores obtidos estão contidos na Tabela 4.2 abaixo:

Tabela 4.2 – Massa unitária dos agregados

Agregado	Massa unitária (Kg/m³)
Miúdo (Areia)	1357,68
Graúdo (Brita)	1452,12
Resíduo (Limalha de aço)	606,06

Fonte: Autor (2023)

Para a massa específica dos agregados, foram realizadas três medições e retirada a média, obtendo-se assim, 2,73 g/cm³ para o agregado miúdo e 2,70 g/cm³ para a mistura de agregado graúdo.

Por fim na Tabela 4.3 abaixo estão os valores das propriedades do aglomerante utilizado, de acordo com dados do fabricante:

Tabela 4.3 – Propriedades do aglomerante utilizado

Propriedade	Valor médio	Unidade
Início tempo de pega	02:37	min
Fim tempo de pega	03:14	min
Blaine	4078	cm²/g
Retido #200	0,46	%
Retido #325	3,07	%
Resistência à compressão - 1 Dia	22,4	MPa
Resistência à compressão - 3 Dias	37,7	MPa
Resistência à compressão - 7 Dias	43	MPa
Resistência à compressão - 28 Dias	51,2	MPa
Massa específica	3,12	g/cm³

Fonte: Adaptado de Itambé cimentos (2023)

4.2 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS CORPOS DE PROVA

Foi realizada a concretagem de todos os corpos de prova utilizados nos ensaios para os 10 traços elaborados, com nenhuma correção no fator água/cimento ou nos materiais utilizados, as medidas de abatimento do tronco de cone foram realizadas nos dias de

concretagem.

A determinação da massa específica foi aferida no dia da desmoldagem dos corpos de prova, representados nas Figura 4.5.

Figura 4.5 – Aspecto típico dos corpos de prova moldados

Fonte: Autor (2023)

O peso médio dos corpos de prova moldados está descrito na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Peso médio dos corpos de prova

Traço	Peso média (kg)	Variação em relação a referência
REF	3,796	0,000%
5A	3,810	0,369%
10A	3,810	0,369%
15A	3,800	0,105%
5B	3,770	-0,685%
10B	3,784	-0,316%
15B	3,820	0,632%
CRF	3,816	0,000%
25F	3,770	-1,205%
50F	3,810	-0,157%

Fonte: Autor (2023)

4.3 PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO

4.3.1 Abatimento de tronco de cone

O *Slump-Test* foi realizado três vezes antes da moldagem dos corpos de prova, os resultados o/médios obtidos neste ensaio estão contidos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultados do abatimento do tronco de cone

Traço	Slump (cm)	Classe (NBR 8953)
REF	1,52	S10
5A	1,80	S10
10A	1,82	S10
15A	1,80	S10
5B	3,80	S10
10B	3,10	S10
15B	3,30	S10
CRF	2,10	S10
25F	5,80	S50
50F	5,00	S50

Fonte: Autor (2023)

Para as substituições de agregados houve um aumento da consistência em relação ao traço de referência, o qual é justificado pela superfície dos resíduos ser mais lisa, ocasionando o maior escorregamento, este efeito da superfície dos resíduos também é visto nas substituições de agregados graúdos, com maiores valores para o abatimento de tronco de cone, com a primeira incorporação de 5% apresentando mais que o dobro da redução de altura comparado com o traço de referência e reduzindo os valores com o aumento da incorporação.

Por fim se referindo as substituições das fibras têm-se que a inserção do resíduo de usinagem resultou em um aumento considerável da fluidez do concreto, com o abatimento de tronco de cone aumentando em até 176,19% este valor, apesar de tanto as fibras quanto as limalhas possuírem superfícies lisas, a geometria em forma de arco juntamente com a dimensão do segundo material contribui para um maior escorregamento, aumentando o abatimento, auxiliando na amenização de um dos principais problemas da utilização de fibras no concreto, a diminuição da trabalhabilidade.

A maior parte dos traços produzidos foram classificados de acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015) como sendo S10, os concretos estruturais extrusados, vibro prensado ou centrifugados. Apenas os traços de substituição de fibras foram classificados como S50, sendo estes aplicados a pavimentos e alguns elementos de fundações. Se utilizados aditivos químicos ainda seria possível a alteração dos traços para a classe S100, que abrange os concretos lançados de maneira convencional para elementos estruturais, porém como se trata de um estudo inicial a respeito da aplicabilidade deste resíduo, optou-se pela não utilização de aditivos químicos.

4.3.2 Massa específica

A massa específica foi determinada utilizando a medida de peso de 5 corpos de prova

de 10cm de diâmetro e 20 cm de altura, e de 2 corpos de prova de 5cm de diâmetro e 10 cm de altura, a massa específica de todos os traços está contida na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Massas específicas

Traço	Massa específica (kg/m³)
REF	2416,61
5A	2450,62
10A	2467,44
15A	2455,18
5B	2440,21
10B	2450,68
15B	2482,61
CRF	2471,31
25F	2443,59
50F	2458,89

Fonte: Autor (2023)

Para as substituições de agregados é visto que o peso específico aumenta, se tratando da substituição em areia este acréscimo foi de 1,407%, 2,104% e 1,596% para as substituições de 5, 10 e 15% respectivamente.

Para a substituição do agregado graúdo o aumento do peso específico foi maior, conforme o aumento da incorporação, com aumentos de 0,977%, 1,410% e 2,731%, para as incorporações de 5, 10 e 15% respectivamente.

Para as fibras houve a redução do peso específico nos dois teores de substituição, sendo de 1,121% e 0,502% a menos para as substituições de 25 e 50% de fibras.

No geral as substituições não alteraram as massas específicas de maneira considerável, visto que a maior variação observada foi de 2,73%, além de que, de acordo com análise de variância realizada não é possível diferenciar as amostrar com grau de confiabilidade considerável, ou seja, estatisticamente a inserção dos resíduos ocasionou apenas uma mudança marginal da massa específica do concreto.

4.4 PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO

Para as propriedades do estado endurecido do concreto, será realizada análise e discussão por tipo de substituição, com a utilização de gráficos para maior compreensão dos comportamentos descritos, vale salientar que todos os valores amostrais obtidos nos ensaios realizados estarão contidos no apêndice A ao final deste trabalho.

4.4.1 Substituição do agregado miúdo por limalha

4.4.1.1 Absorção de água, índice de vazios e massas específicas

O traço de referência “REF” obteve 9,0% de absorção de água, todas as incorporações de limalha de aço diminuíram o índice de absorção de água, com a maior redução obtida no teor de 10%, com redução de 38,6%, os traços com 5% e 15% reduziram 19,8% e 31,1% respectivamente.

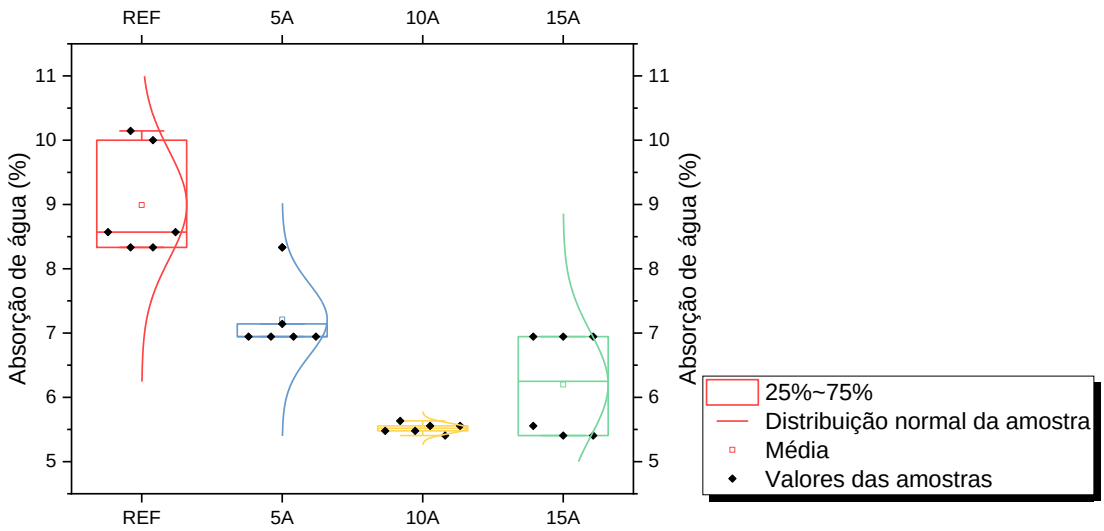
O gráfico representado pela Figura 4.6 juntamente com a Tabela 4.7 demonstram os resultados obtidos neste ensaio:

Tabela 4.7– Absorção de água das substituições de agregado miúdo

Absorção de água		
Traço	Absorção de água	Variação em relação a referência
REF	8,99%	-
5A	7,21%	-19,83%
10A	5,52%	-38,63%
15A	6,20%	-31,05%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.6 – Absorção de água das substituições de agregado miúdo



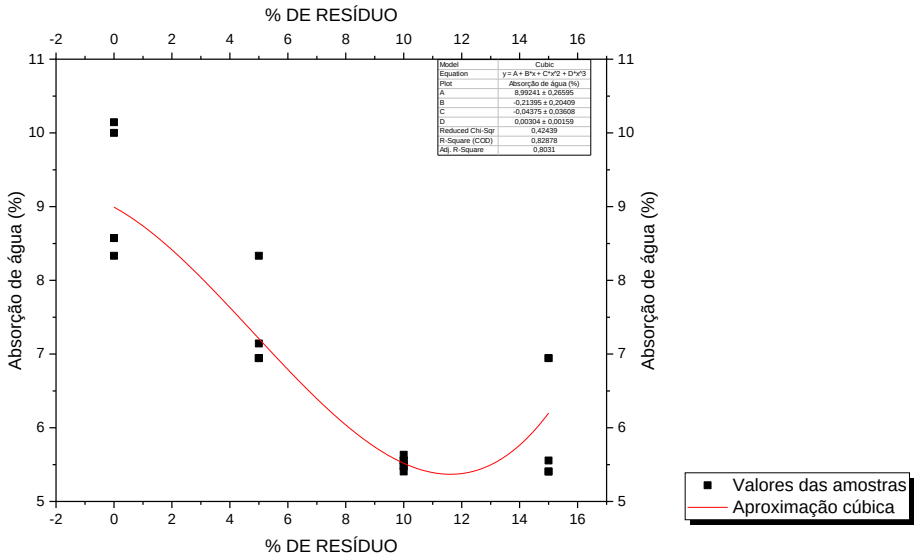
Fonte: Autor (2023)

A análise estatística realizada demonstrou que as médias de todos os traços são diferentes com uma confiabilidade de 95%, logo é possível afirmar que, com este grau de precisão, a substituição da areia por limalha de aço de fato reduz a absorção de água pelo

concreto em todos os teores analisados.

Foi possível a realização da aproximação não linear com fator R^2 de 0,803, representada na Figura 4.7 abaixo:

Figura 4.7 – Absorção de água por teor de substituição de agregado miúdo



Fonte: Autor (2023)

Nota-se pela curva que, os teores que possivelmente apresentam as maiores reduções na absorção de água estão entre 11% e 12%, com tendência a maiores absorções de água após estes teores, implicando em uma piora na qualidade do concreto em comparação ao teor de 10%, com a granulometria do resíduo não mais auxiliando no preenchimento dos vazios concreto.

Com relação aos índices de vazios obtidos nos ensaios, o traço de referência obteve uma média de 20,75%, com a redução dos índices de vazios em todas as incorporações de limalhas de aço, com os teores de 5%, 10% e 15% reduzindo este parâmetro em 13,2%, 33,5% e 24,9% respectivamente, implicando em um melhor preenchimento dos vazios do concreto com a inserção do resíduo, com este complementando a granulometria do agregado utilizado.

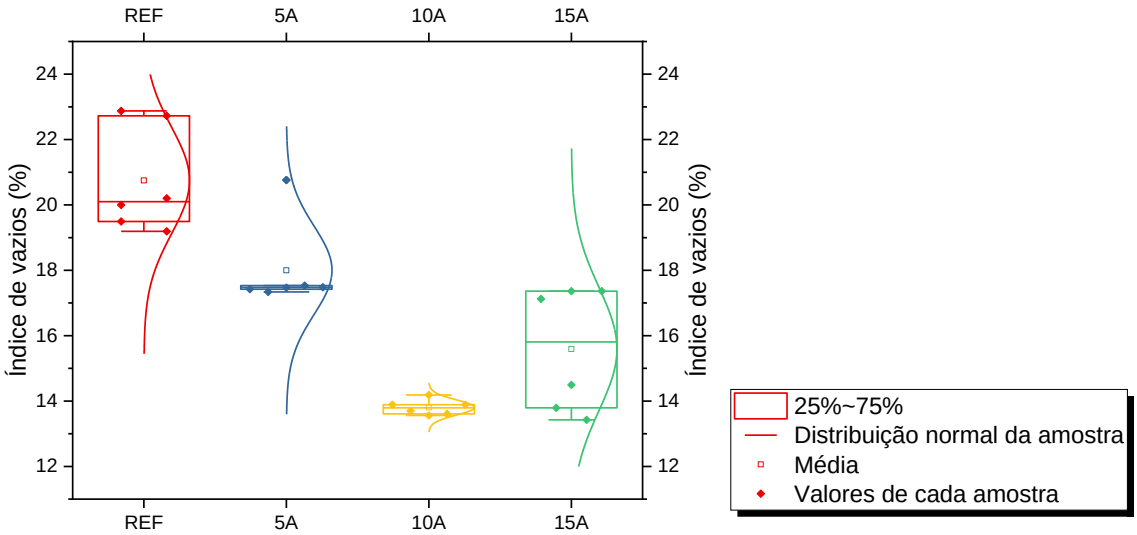
A Figura 4.8 juntamente com a Tabela 4.8 apresentam os valores obtidos em todas as amostras.

Tabela 4.8 – Índice de vazios das substituições de agregado miúdo

Índice de vazios		
Traço	Índice de vazios	Variação em relação a referência
REF	20,75%	-
5A	18,00%	-13,24%
10A	13,80%	-33,47%
15A	15,59%	-24,85%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.8 – Índice de vazios das substituições de agregado miúdo

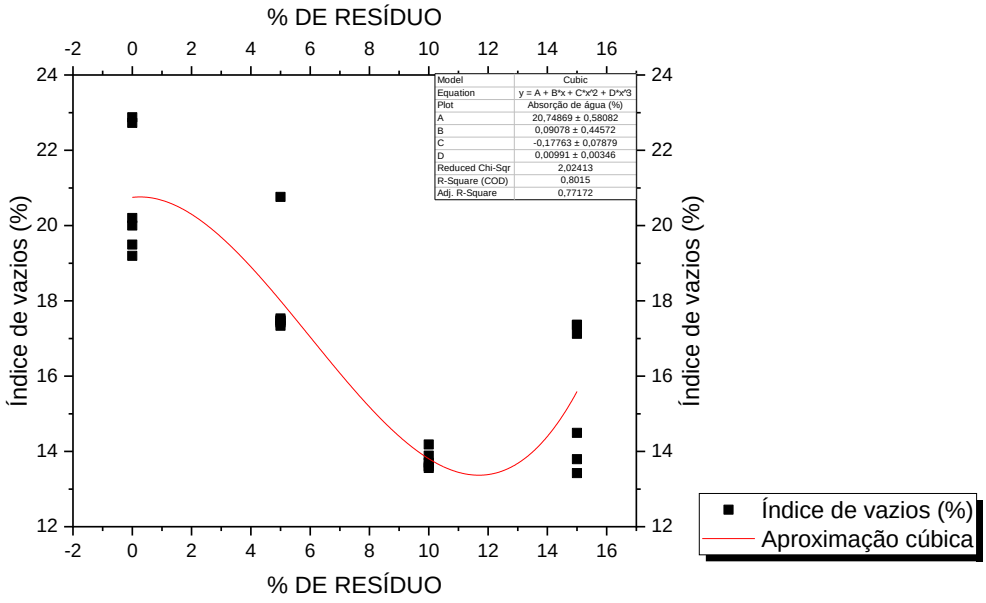


Fonte: Autor (2023)

A análise estatística foi realizada novamente, garantindo que todas as amostras possuem médias significativamente diferentes com confiabilidade de 95%, sendo possível afirmar que houve então a redução do índice de vazios com a incorporação de limalha de aço.

Para determinação do teor máximo de redução do índice de vazios foi realizada a aproximação não linear dos dados obtidos, obtendo um fator R^2 de 0,801, conforme mostrado na Figura 4.9 abaixo.

Figura 4.9 – Índice de vazios por teor de substituição de agregado miúdo



Fonte: Autor (2023)

É possível observar, assim como para a absorção de água, o teor de substituição de agregado miúdo por limalha de aço que apresenta a maior redução no índice de vazios está entre 11% e 12%.

A redução do índice de vazios juntamente com a absorção de água no concreto indica que a inserção do resíduo ocasionou um preenchimento melhor dos vazios do concreto, até determinada proporção.

Tal acontecimento pode ser justificado levando em consideração tanto formato quanto o tamanho não serem rigorosamente fixos, o que pode providenciar um melhor encaixe entre eles, com incorporações próximas a 12% apresentando preenchimento melhor dos vazios da mistura em comparação aos grãos de areia.

Por fim, este ensaio também possibilitou a obtenção das massas específicas, seca, saturada e real dos concretos produzidos, os resultados obtidos estão descritos na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Massas específicas das substituições de agregado miúdo

Traço	Massa específica seca média	Variação	Massa específica saturada média	Variação	Massa específica real média	Variação
REF	2310,05	0,00%	2517,54	0,00%	2915,18	0,00%
5A	2497,37	8,11%	2677,38	6,35%	3046,25	4,50%
10A	2501,69	8,30%	2639,73	4,85%	2902,40	-0,44%
15A	2518,23	9,01%	2674,16	6,22%	2984,12	2,36%

Fonte: Autor (2023)

Considerando a massa específica seca do concreto, é notório que, quanto maior o teor de incorporação maior o valor obtido deste parâmetro, chegando à variação máxima de 9,01% com a incorporação de 15%, porém todos os traços possuíram classificação de acordo com a NBR 8953(ABNT, 2015) como “concreto normal”, que abrange os concretos que possuem massa específica entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³ .

A massa específica saturada também aumentou em todos as incorporações, porém obteve o mínimo de acréscimo na incorporação de 10%, e um valor relativamente semelhante nas incorporações de 5% e 15%.

Por fim a massa específica real foi reduzida marginalmente na substituição de 10%, com incremento máximo de 4,50% na incorporação de 5% de limalha.

No geral pode-se afirmar que a incorporação de limalha de aço tende a aumentar a massa específica do concreto, resultado este esperado, visto que, o agregado miúdo substituído possui massa específica inferior a limalha de aço.

4.4.1.2 Resistência a compressão

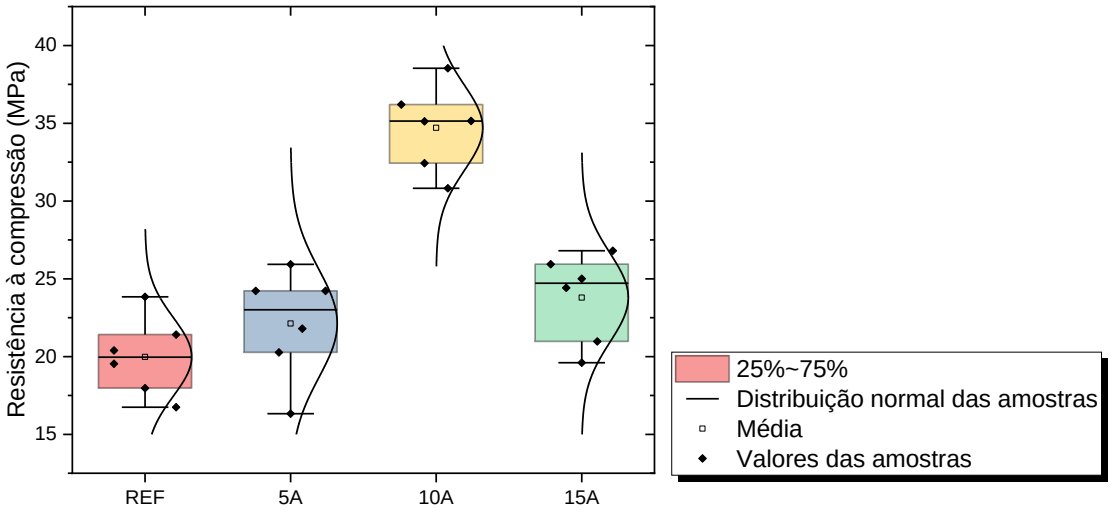
O acréscimo de resistência à compressão foi observado para todas as substituições, com valor de 19,98 MPa para a referência “REF”, e incrementos de 10,74%, 73,70% e 19,07% de aumento das médias para os traços com substituição de 5%, 10% e 15% respectivamente, os valores obtidos podem ser observados na Figura 4.10 e as médias na Tabela 4.10:

Tabela 4.10 – Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de agregado miúdo

Resistência à compressão 28 dias		
Traço	Resistência (MPa)	Variação em relação a referência
REF	19,98	-
5A	22,13	10,74%
10A	34,71	73,70%
15A	23,79	19,07%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.10 – Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de agregado miúdo

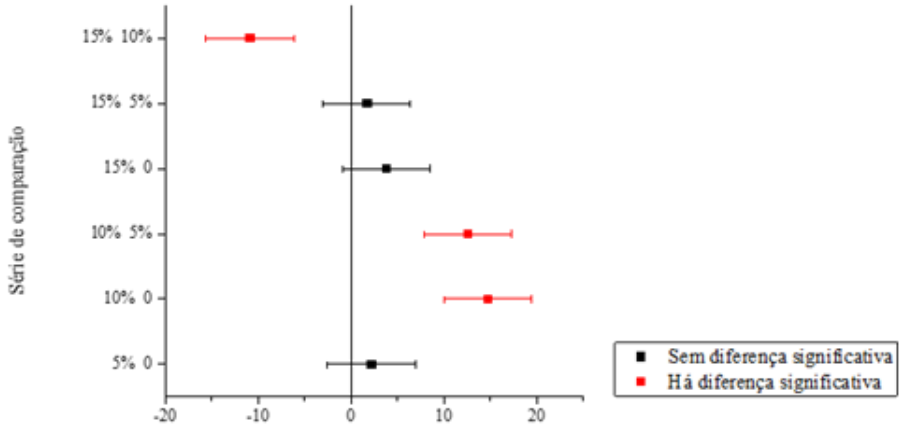


Fonte: Autor (2023)

De acordo com a análise de variância realizada, observa-se que em relação ao traço de referência, as amostras com 5% e 15% não são diferentes de maneira significativa com confiabilidade de 95%, obtendo uma confiabilidade de 75% para o primeiro caso e 90% para o segundo, enquanto a substituição de 10% possui valor de 95% de confiabilidade.

A figura 4.11 demonstra ainda a comparação entre cada traço com confiabilidade de 95%, nota-se que todas as comparações envolvendo o teor de 10% demonstraram que a média desta amostragem é de fato diferente, sendo assim o acréscimo da resistência é notório e válido para este teor de substituição.

Figura 4.11 – Comparação das médias obtidas entre cada traço

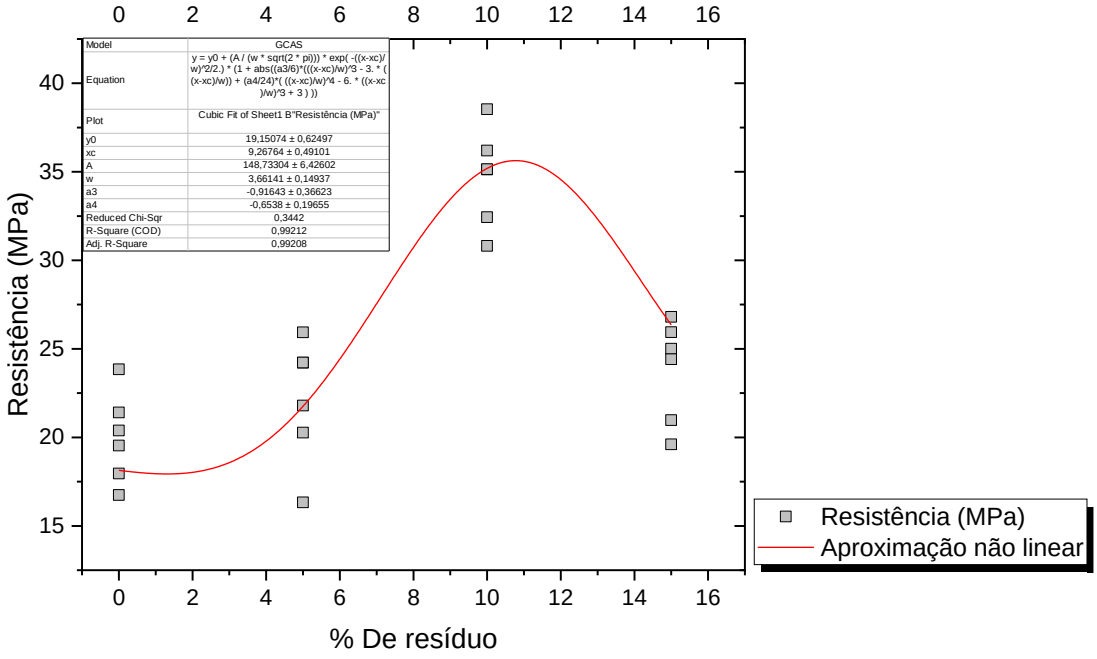


Fonte: Autor (2023)

Ainda para a compressão foi obtida uma aproximação não linear da resistência esperada

com o teor de substituição realizado, o fator R^2 da curva foi de 0,992, determinando assim para a compressão o teor ótimo de substituição de agregado miúdo na faixa de 10% a 12%, em relação ao peso de cimento.

Figura 4.12 – Resistência a compressão em relação ao teor de substituição de agregado miúdo



Fonte: Autor (2023)

É válido notar que, de acordo com as aproximações não lineares realizadas, o teor ótimo de substituição de agregado miúdo por limalha de aço, para o incremento da resistência a compressão do concreto, é também o teor que apresentou maiores reduções da absorção de água e índices de vazios.

O aumento da resistência a compressão no concreto com substituição do agregado miúdo por limalha de aço em relação ao peso de cimento é visto em pesquisas como a de Malek *et al.* (2021), que obtiveram um aumento de 13,5%, 20,80%, e 36,30% para os teores de 5%, 10% e 15% e a de Prabu *et al.* (2021) em que, os incrementos foram de 19,1%, 20% e 21%, nos teores de 3%, 6% e 9%, comparativamente a presente pesquisa obteve os melhores resultados em teores próximos a 10%, como já citado, incrementos de 10,74%, 73,70% e 19,07% para os teores de 5%, 10% e 15% respectivamente.

Os teores ótimos variam em cada pesquisa, visto não só a variabilidade de resíduos utilizados como também a diferença nos parâmetros dos outros materiais, como as curvas

granulométricas dos agregados, porém, é notório observar que todas obtiveram incrementos de resistência à compressão quando substituído o agregado miúdo pela limalha de aço.

O ensaio de resistência aos 91 dias foi utilizado para determinação da evolução da resistência com idades mais avançadas.

A confecção da curva de evolução de resistência do concreto foi realizada de acordo com o modelo de equação presente no item 12.3.3 da NBR 6118 (ABNT, 2023), sendo colocada no *software originLab* da seguinte forma:

$$Y = fc.\exp(s.(1 - \left(\frac{28}{x}\right)^{0,5}) \quad (4.1)$$

em que: y = Valores de resistência obtidos em x dias (MPa);
fc = Resistência à compressão do concreto (MPa);
s = Parâmetro normativo de valor 0,2 para cimento CPV;
x = Idade das amostras (dias).

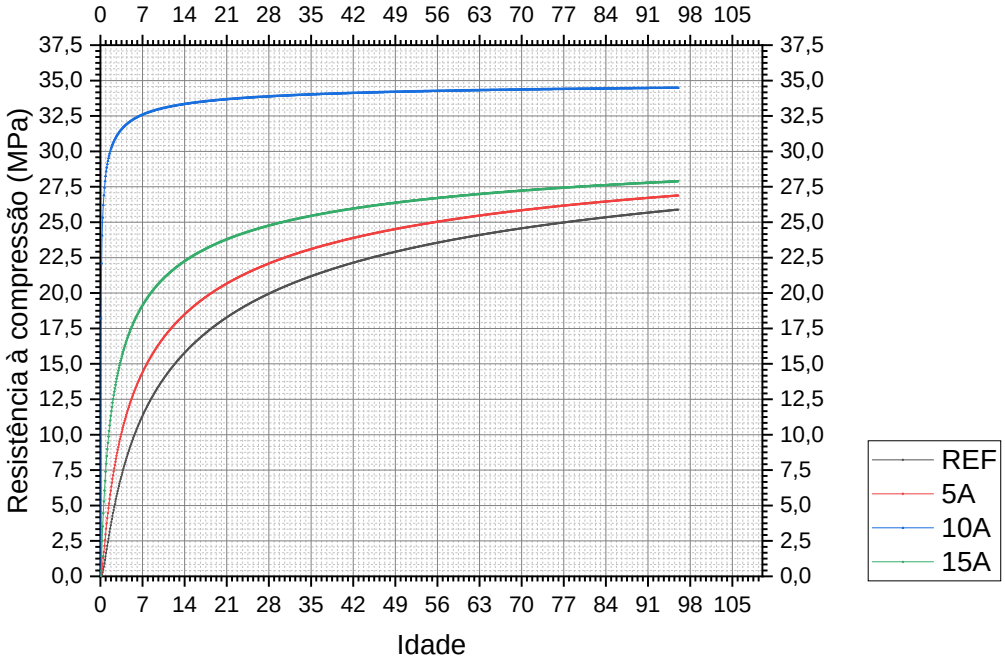
Os valores médios da resistência à compressão aos 91 dias estão presentes na Tabela 4.11, e as curvas obtidas possuíram fator R^2 superior a 0,98 para todos os casos, e são representadas na Figura 4.13:

Tabela 4.11 – Evolução da resistência à compressão para as substituições de agregado miúdo

Resistência à compressão 91 dias		
Traço	Resistência (MPa)	Variação em relação a referência
REF	25,85	-
5A	26,83	3,79%
10A	31,94	23,56%
15A	22,74	-12,03%

Fonte: Autor (2023).

Figura 4.13 – Evolução da resistência à compressão para as substituições de agregado miúdo



Fonte: Autor (2023).

A curva realizada conforme instruções da NBR 6118 (ABNT, 2023), demonstra que houve estabilização nos valores obtidos de resistência à compressão, é possível afirmar que, mesmo com a redução nos valores amostrais, de acordo com o prescrito normativamente os traços apresentaram estabilização nos valores de resistência à compressão após os 28 dias, com a limalha mantendo o acréscimo de resistências em idades avançadas.

4.4.1.3 Resistência à tração indireta

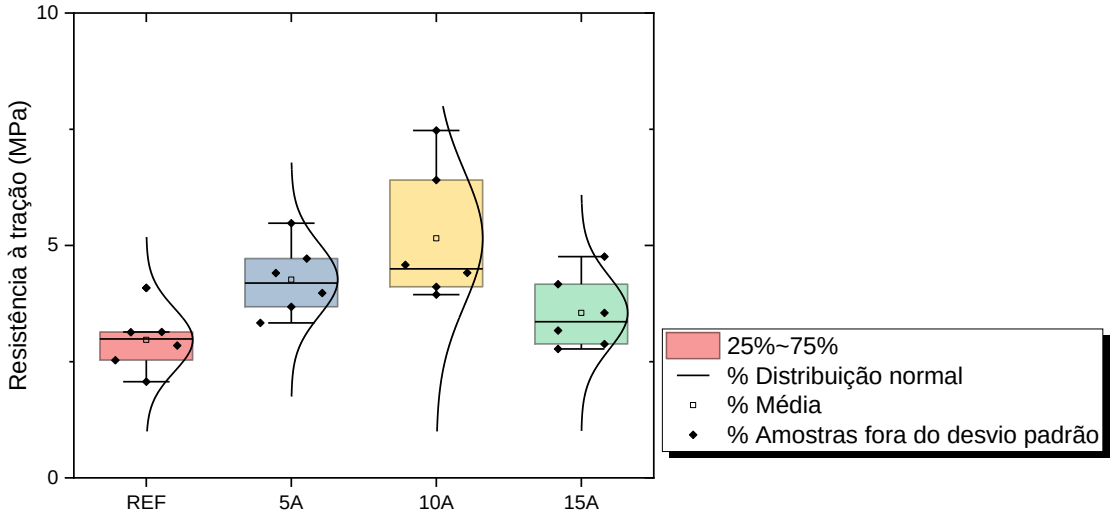
Assim como para a compressão, a tração indireta houve também o acréscimo observado para todas as substituições, o traço de referência “REF” possui valor médio de 2,97MPa, com aumento de 43,75%, 73,70% e 19,62% de aumento das médias para os traços com substituição de 5%, 10% e 15% respectivamente, os valores obtidos para cada amostras podem ser observados na Figura 4.14 e na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Resistência a tração indireta aos 28 dias das substituições de agregado miúdo

Resistência à tração 28 dias		
Traço	Resistência (MPa)	Variação em relação a referência
REF	2,97	-
5A	4,27	43,75%
10A	5,15	73,71%
15A	3,55	19,62%

Fonte: Autor (2023).

Figura 4.14 – Resistência a tração indireta aos 28 dias das substituições de agregado miúdo

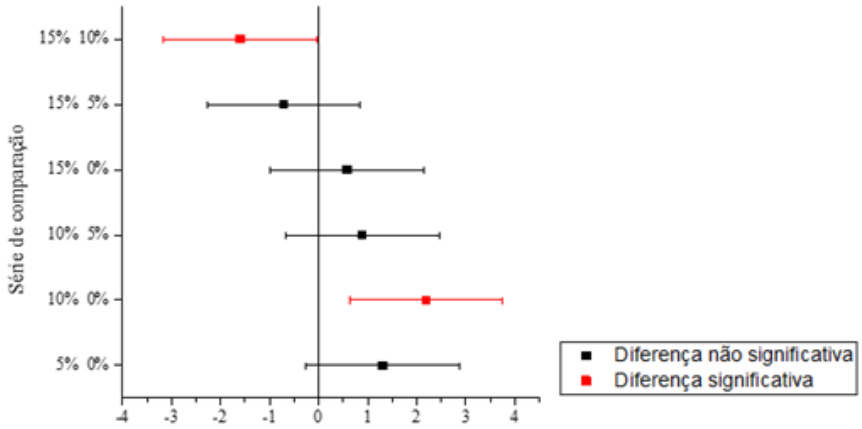


Fonte: Autor (2023).

De acordo com a análise de variância realizada, observa-se que em relação ao traço de referência “REF”, as amostras com 5% e 15% possuíram confiabilidade na análise inferior a 95%, obtendo um valor de 90% para o primeiro caso e 80% para o segundo, enquanto a substituição de 10% possui valor de 95% de confiabilidade.

A figura 4.15 mostra a comparação realizada entre cada traço utilizando o valor de 95% para confiabilidade, é interessante notar que a comparação do traço de 10% com o de 5%, diferente do observado na compressão, não possui médias diferentes neste grau de análise.

Figura 4.15 – Comparação das médias obtidas entre cada traço na tração indireta



Fonte: Autor (2023)

Ao contrário da compressão, com os dados obtidos na tração não foi possível determinar uma aproximação não linear a qual o fator R^2 da curva encontrava-se superior a 0,8, de tal forma, a determinação de teores ótimos de incorporação deve ser realizada conforme ao observado na resistência à compressão, em que a aproximação não linear se deu consideravelmente precisa.

Mesmo não sendo realizada a aproximação não linear é notório que, para a tração indireta, o teor de substituição de agregado miúdo por limalha de aço obteve os melhores resultados próximos ao observado na compressão, sendo o de 10 %.

Assim como para a compressão, Althoey e Holsen (2021) também observaram incrementos na tração indireta de até 11%, utilizando 20% de limalha de aço em relação ao peso dos agregados. Prabu *et al.* (2021) também observaram aumentos neste parâmetro, na ordem de 35,8%, 35,1%, e 40,2%, para os teores de 3%, 6%, 9% e 12%, já Malek *et al.* (2021), encontraram incrementos de até 38,40% no teor de 15% de substituição do agregado miúdo.

Assim como para a compressão, é observado o aumento da resistência à tração indireta do concreto em todos os teores analisados, porém assim como observados nas pesquisas citadas, o incremento na resistência à tração tende a ser muito mais notório que o da compressão, considerando o fato do aço resistir melhor aos esforços de tração do que os de compressão.

4.4.1.4 Módulo de elasticidade dinâmico – NBR 8802 (Ultrassom)

Os valores para a velocidade de propagação de ondas de ultrassom obtidos estão demonstrados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Velocidade das ondas de ultrassom – Substituição de agregado miúdo

Traço	Velocidade de propagação de onda de ultrassom média (km/s)	Variação	Desvio Padrão
REF	4,52	0,00%	0,04
5A	4,61	1,99%	0,07
10A	4,73	4,72%	0,09
15A	4,56	0,88%	0,04

Fonte: Autor (2023)

A velocidade de propagação da onda de ultrassom é um importante parâmetro para determinação da qualidade do concreto produzido, a tabela contida na Figura 4.16 apresenta uma classificação da qualidade do concreto conforme esta velocidade:

Figura 4.16 – Relação da velocidade de onda do ultrassom com qualidade do concreto

Velocidade da Onda Ultra-sônica (m/s)	Qualidade do Concreto
V > 4500	Excelente
3500 < V < 4500	Ótimo
3000 < V < 3500	Bom
2000 < V < 3000	Regular
V < 2000	Ruim

Fonte: Rincon *et al.* (1998) apud Valin Jr *et al.* (2017).

Quanto maior a velocidade da onda ultrassônica maior é a qualidade do concreto, de acordo com os valores obtidos, a inserção da limalha melhorou a qualidade do concreto, com as maiores velocidades na incorporação de 10%, esta melhora também foi observada nos do ensaio de absorção de água.

Com a velocidade de ultrassom e utilizando os valores de massa específica já calculados para cada traço é possível então determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto através da equação 4.1 baseada na ASTM C597:2016:

$$E_d = V^2 . \rho . \frac{(1+\mu).(1-2\mu)}{(1-\mu)} \tag{4.2}$$

em que: E_d = Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)

V = Velocidade de propagação da onda de ultrassom (m/s);

ρ = Massa específica do concreto (kg/m³);

μ = Coeficiente de Poisson, adotado como sendo de 0,2.

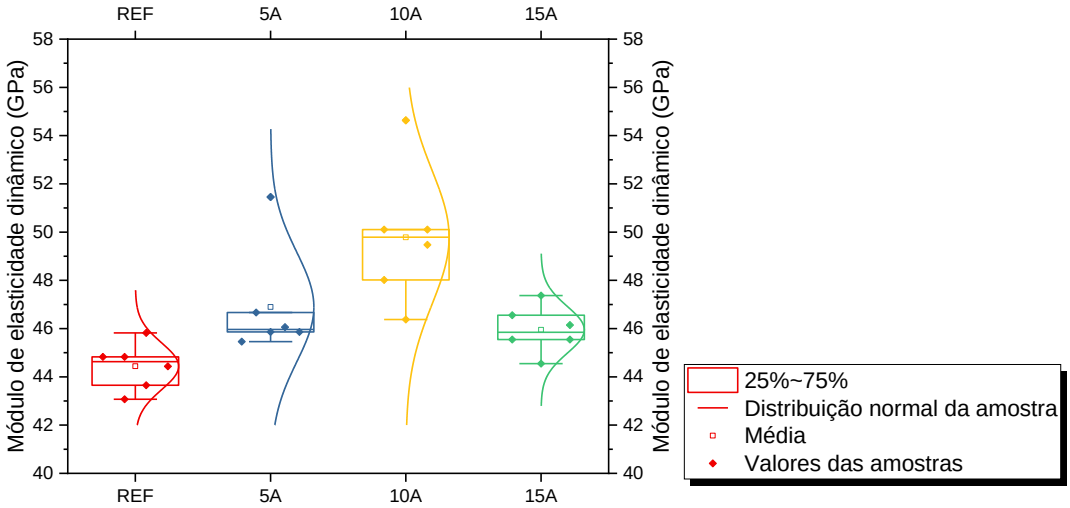
O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido para cada amostra, com o traço de referência possuindo um valor médio deste parâmetro de 44,44 GPa, todas as incorporações aumentando o módulo em 5,53%, 12,03% e 3,40%, para os teores de 5%, 10% e 15% respectivamente, os valores obtidos estão representados na Tabela 4.14 e pelo Gráfico expresso pela Figura 4.17.

Tabela 4.14 – Módulo de elasticidade para cada substituição de agregado miúdo

Módulo de elasticidade por ultrassom		
Traço	Módulo dinâmico (GPa)	Variação em relação a referência
REF	44,44	-
5A	46,89	5,53%
10A	49,79	12,03%
15A	45,95	3,40%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.17 – Módulo de elasticidade para cada substituição de agregado miúdo



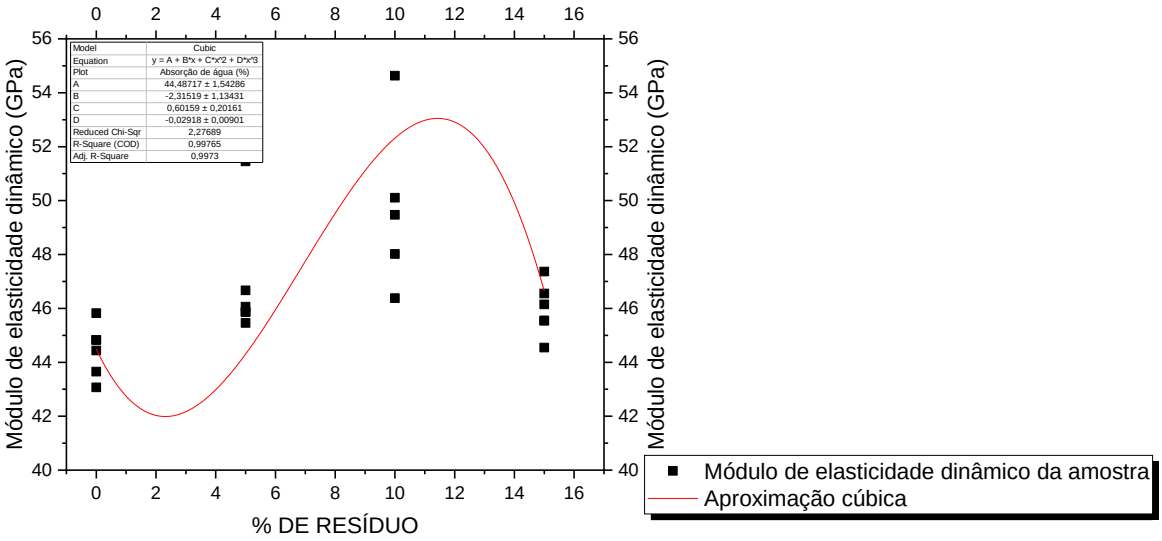
Fonte: Autor (2023)

De acordo com a análise estatística realizada, todas as incorporações apresentaram médias significativamente diferentes com o grau de confiabilidade de 95%, ou seja, com este grau de confiança é possível afirmar que as incorporações de limalha de aço resultaram no acréscimo do módulo de elasticidade dos concretos produzidos.

Foi realizada também a aproximação não linear dos resultados, determinando uma aproximação cúbica com fator R^2 de 0,99, demonstrada na Figura 4.18.

É observado que o teor ótimo de incorporação para incremento do módulo de elasticidade do concreto está na faixa de 10% a 12%.

Figura 4.18 – Módulo de elasticidade dinâmico por teor de substituição de agregado miúdo



Fonte: Autor (2023)

É observado a tendência de redução do módulo para a substituição superiores a 15%, assim como observado para as resistências mecânicas, tal fator pode estar atrelado a qualidade dos agregados presentes no concreto, quando estes são de baixa qualidade ou inadequados podem levar a uma diminuição do módulo de elasticidade dinâmico.

Sendo assim, apesar da limalha de aço como substituição ao agregado miúdo apresentar resultados positivos em determinadas proporções, a partir de uma certa quantidade, este material pode reduzir a qualidade geral dos agregados presentes no concreto, o que causa uma diminuição das propriedades mecânicas e da qualidade geral do concreto, e de fato, a partir da substituição de 15%, esta tendência foi observada na resistência à compressão e tração, na absorção de água, índice de vazios e módulo de elasticidade.

O aumento do módulo de elasticidade dinâmico do concreto foi observado também no trabalho desenvolvido por Malek *et al.* (2021), em que a inserção de limalhas de aço nos teores de 5%, 10% e 15% ocasionaram aumentos de 0,6%, 3,75% e 6,25% respectivamente, demonstrando que a substituição dos agregados miúdos pelos resíduos tende a ocasionar o aumento do módulo de elasticidade em todas as incorporações que estejam contidas nesta faixa de estudo.

Considerando que, o agregado miúdo possui o módulo de elasticidade inferior que o do aço, o aumento deste parâmetro no concreto é esperado conforme se aumentam os teores de incorporações, até determinado limite, que para este caso foi encontrado como sendo 12%.

4.4.1.5 Módulo de elasticidade dinâmico – NBR 8522-2 (*Sonelastic)*

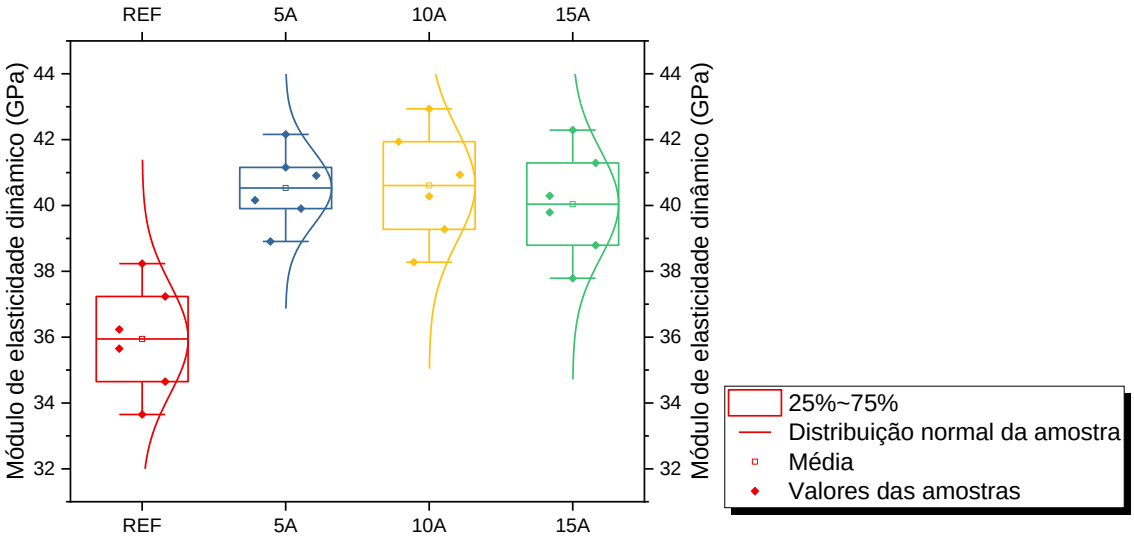
Semelhante ao visto na determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da leitura de velocidade de propagação de ondas de ultrassom, o valor deste parâmetro aumentou em todas as incorporações com acréscimo máximo de 12,98%, também no traço com 10% de substituição, os valores médios bem como os das amostras estão representados na Tabela 4.15 e Figura 4.19.

Tabela 4.15 – Módulo de elasticidade (*Sonelastic)* para cada substituição de agregado miúdo

Módulo de elasticidade com Sonelastic		
Traço	Módulo dinâmico (GPa)	Variação em relação a referência
REF	35,94	-
5A	40,03	11,38%
10A	40,61	12,98%
15A	38,79	7,93%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.19 – Módulo de elasticidade (*Sonelastic)* para cada substituição de agregado miúdo

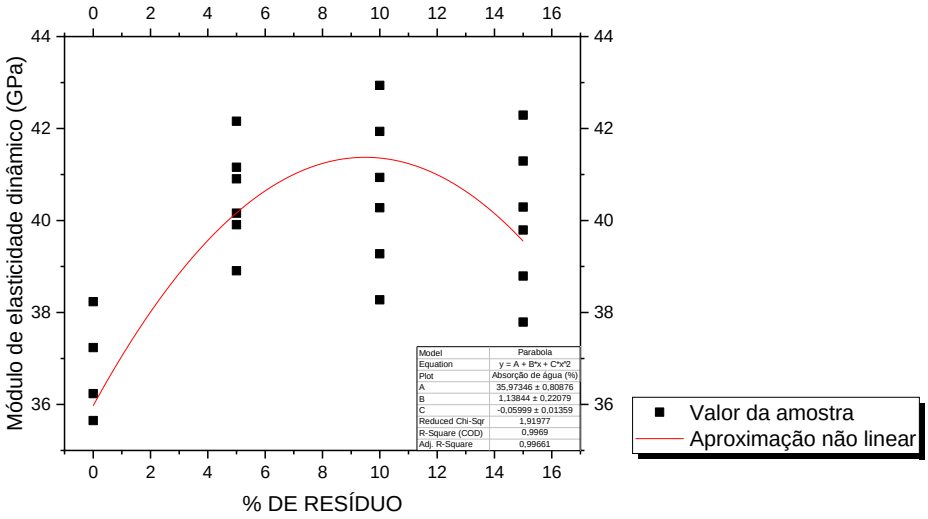


Fonte: Autor (2023)

De acordo com a análise de variância, todas as incorporações apresentaram médias significativamente diferentes com o grau de confiabilidade de 95% em relação ao traço de referência “REF” , sendo possível afirmar (com este grau de confiança) que as incorporações de limalha de aço resultaram no acréscimo do módulo de elasticidade dinâmico dos concretos produzidos.

A aproximação não linear foi realizada obtendo fator R^2 obtido de 0,99737, conforme Figura 4.20, essa então, representando uma boa aproximação do comportamento desta propriedade no intervalo de estudo.

Figura 4.20 – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)* por teor de substituição de agregado miúdo



Fonte: Autor (2023)

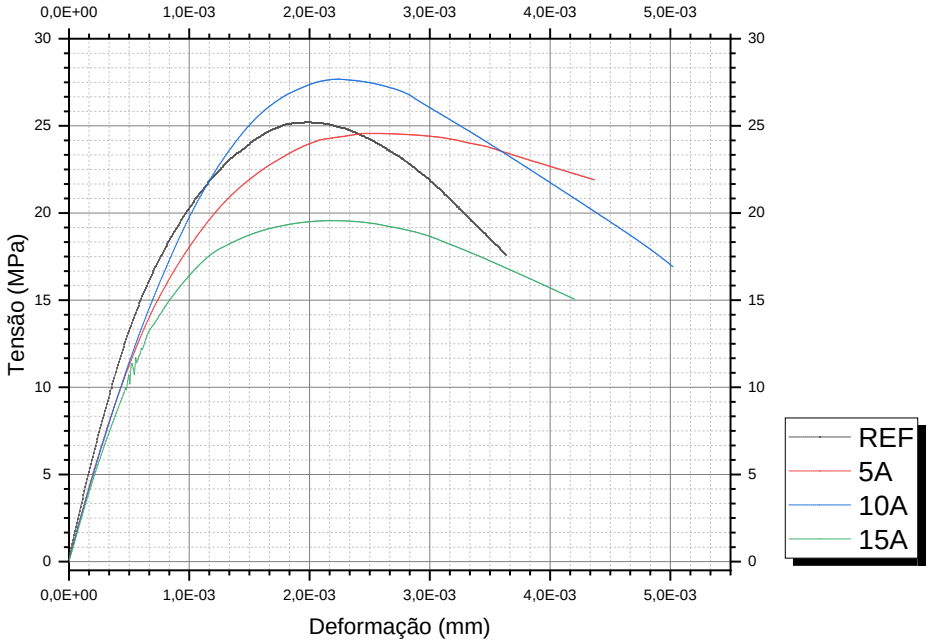
Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico pelo método da frequência natural de vibração estão de acordo com os valores obtidos pela metodologia da leitura da velocidade de propagação de ondas de ultrassom, não só aumentando em todos as incorporações como também tendo teor ótimo entre 10% e 12% e demonstrando pela curva, a tendência de queda em incorporações superiores.

Vale destacar que a comparação entre os valores de módulo de elasticidade dinâmico pelas duas metodologias e do módulo estático foi realizada, estando presente no capítulo 4.4.1.7 juntamente com as discussões a respeito.

4.4.1.6 Módulo de elasticidade estático – NBR 8522-1

Com a leitura obtida da tensão deformação de cada amostra, foi realizada a interpolação não linear dos dados, gerando assim a curva tensão por deformação média para cada traço, a fim de facilitar o entendimento do comportamento que cada incorporação ocasionou, a Figura 4.21 demonstra cada uma destas curvas médias.

Figura 4.21 – Curvas tensão por deformação para as substituições de agregados miúdos



Fonte: Autor (2023)

Foi constatado que as incorporações de 5% e 10% ocasionaram aumentos na área sob a curva, o que implica no acréscimo da tenacidade do concreto. Com as leituras obtidas não é possível afirmar que o mesmo ocorre para a incorporação de 15%, sendo necessário obtenção de leituras em deformações maiores para tal.

O aumento da tenacidade do concreto é visto quando fibras estão presentes, ou seja, a adição do resíduo de usinagem no concreto nos teores de 5% e 10% proporcionaram um comportamento fibroso, juntamente com o incremento nas resistências à compressão e tração.

Foi realizado por fim o cálculo do módulo de elasticidade inicial para cada corpo de prova ensaiado, assim como para a curva média de cada traço representada na Figura 4.21, os valores obtidos em GPa estão contidos na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Módulo de elasticidade estático para substituições de agregado miúdo

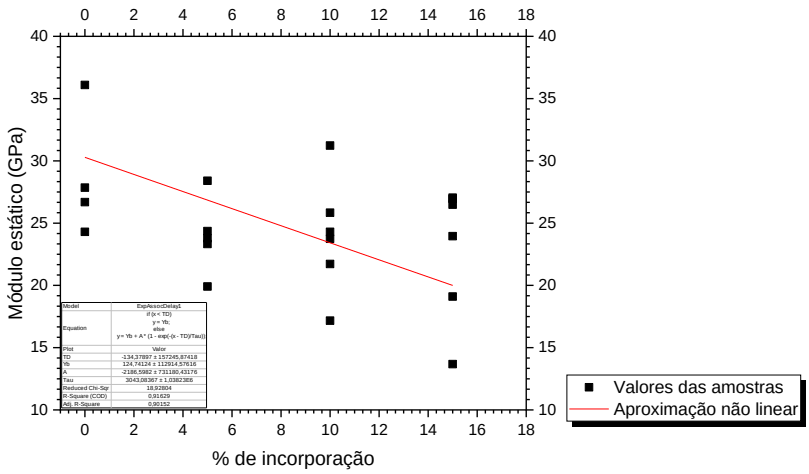
	REF	5A	10A	15A
CP1	-	28,40	23,74	26,94
CP2	24,30	-	25,84	27,04
CP3	36,09	19,91	31,23	26,48
CP4	27,85	24,36	17,17	13,69
CP5	26,69	23,78	24,30	19,10
CP6	-	23,32	21,72	23,95
Média	**28,73**	**23,95**	**24,00**	**22,87**
Variação	0	-17%	-16%	-20%
Módulo da curva média	**29,35**	31,65	34,78	32,56

Fonte: Autor (2023)

Ao contrário do observado no módulo de elasticidade dinâmico, as incorporações reduziram o módulo de elasticidade estático em até 20%, é visto um maior desvio padrão neste ensaio, demonstrando maiores variações nos valores obtidos se comparado aos métodos não destrutivos, se desprezadas as amostras distantes em até 20% da média é observado valor semelhante para todos os traços nesta propriedade, é observado também que a média obtida de cada traço é próxima do valor obtido da curva média, demonstrando a coerência da interpolação realizada.

A análise de variância das médias realizadas obteve um índice de confiabilidade de 85% para todas as incorporações em relação ao traço de referência. A aproximação não linear do valor do módulo por teor de incorporação foi realizada com fator R^2 de 0,91629 e pode ser observado na Figura 4.22 abaixo.

Figura 4.22 – Módulo de elasticidade estático por teor de substituição de agregado miúdo



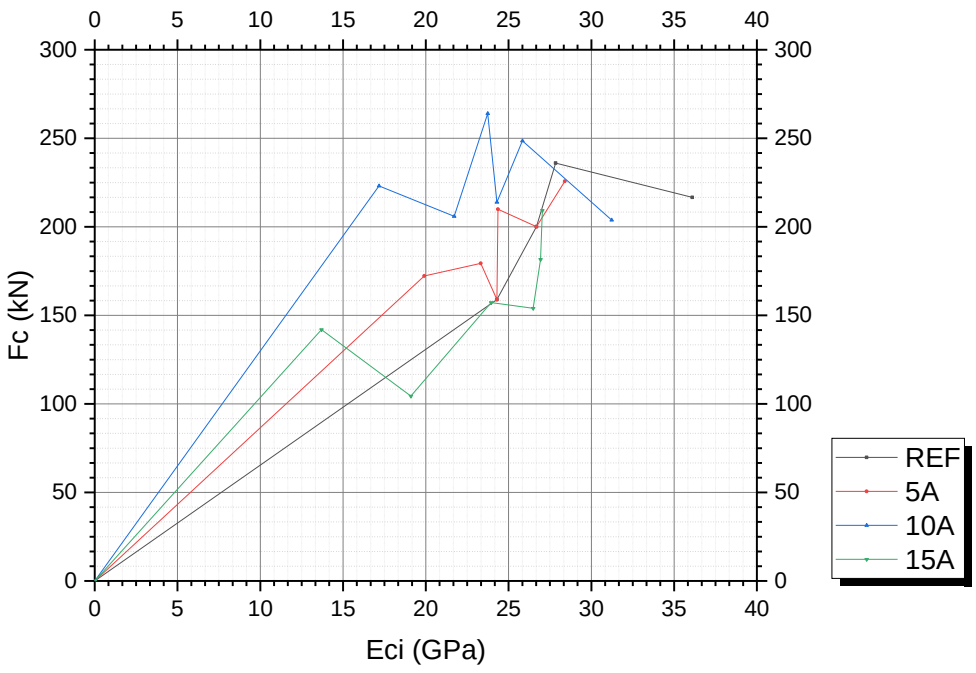
Fonte: Autor (2023)

4.4.1.7 Correlações entre as resistências obtidas e os módulos de elasticidade

Algumas correlações entre os parâmetros, até então apresentados, foi realizada para maior entendimento do comportamento dos concretos produzidos com a incorporação de limalha de aço, todas as curvas que serão apresentadas a seguir possuem fator R^2 superior a 0,97, implicando em boas representações dentro do intervalo de estudo.

A primeira correlação realizada foi a de carga de ruptura à compressão (fc) pelo módulo de elasticidade estático obtido pela curva de tensão por deformações específicas, conforme Figura 4.23 abaixo:

Figura 4.23 – Carga de ruptura à compressão X Módulo estático



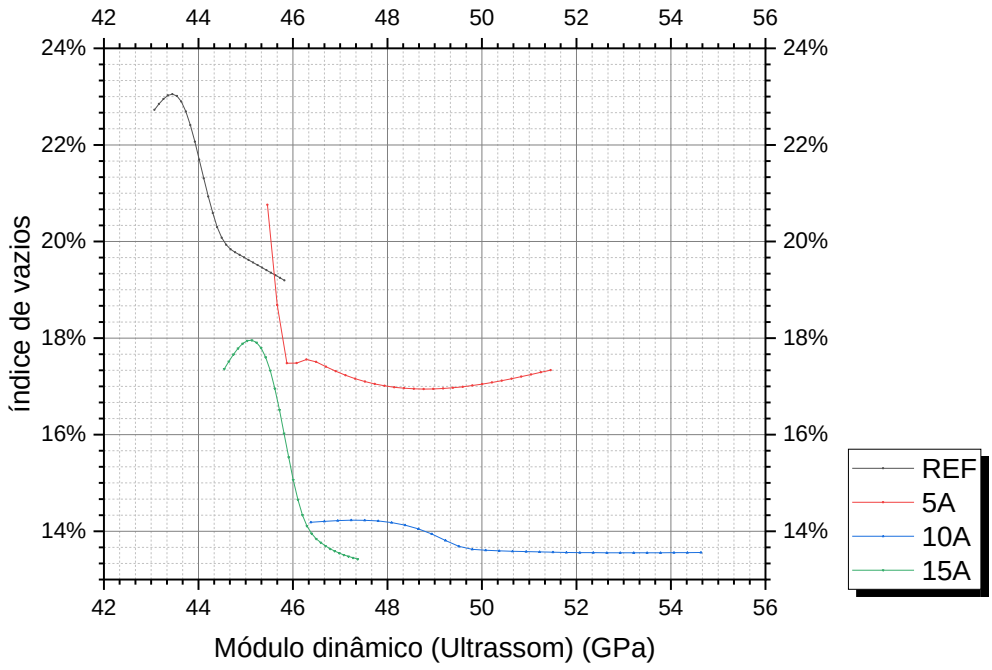
Fonte: Autor (2023)

É notório a alta variabilidade obtida nos valores de módulos pelas cargas de ruptura à compressão de todos os traços envolvendo a incorporação de limalha, principalmente no traço "10A", onde na faixa de carga de 200 a 250 kN o módulo apresentou diversos valores diferentes, sendo justificados por conta da variabilidade da geometria do resíduo de usinagem.

Já o concreto convencional possui baixa variabilidade em seus valores, com o módulo aumentando juntamente com a carga, indicando módulos mais previsíveis e confiáveis.

Foi relacionado também o módulo de elasticidade dinâmico com o índice de vazios do concreto, conforme Figura 4.24.

Figura 4.24 – Índice de vazios X Módulo dinâmico (Ultrassom)



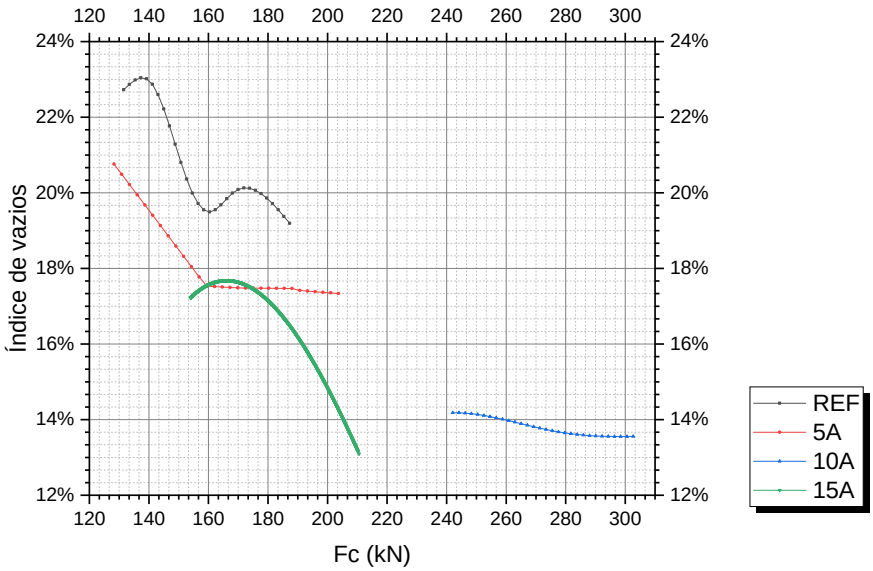
Fonte: Autor (2023)

O comportamento das curvas representativas dos traços “REF”, “5A” e “10A” se mostram semelhantes, funções decrescentes com tendência a estabilização, com o módulo aumentando conforme o índice de vazios são reduzidos, sendo este comportamento o esperado, pois, a redução desta característica no concreto indica também uma maior qualidade no concreto produzido, o qual tende a possuir melhora nas propriedades mecânicas.

O mesmo comportamento também é visto para “10A”, porém o trecho decrescente ocorre de maneira menos abrupta que nos casos anteriores, demonstrando uma menor influência do índice de vazios em relação aos módulos de elasticidade obtidos, com o acréscimo dos módulos estando atrelado principalmente ao tipo de agregado utilizado.

A correlação entre índice de vazios e a carga de ruptura do concreto à compressão também foi realizada, com os resultados semelhantes ao visto na curva anterior, conforme esperado o aumento da qualidade do concreto produzido está relacionado diretamente com a melhora das propriedades mecânicas do mesmo, as curvas desta correlação é observado na Figura 4.25.

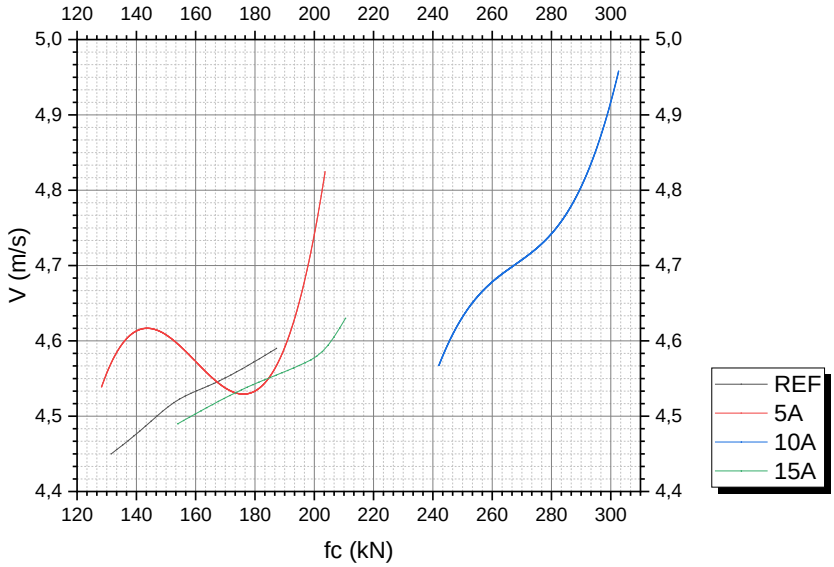
Figura 4.25 – Índice de vazios X Carga de ruptura à compressão



Fonte: Autor (2023)

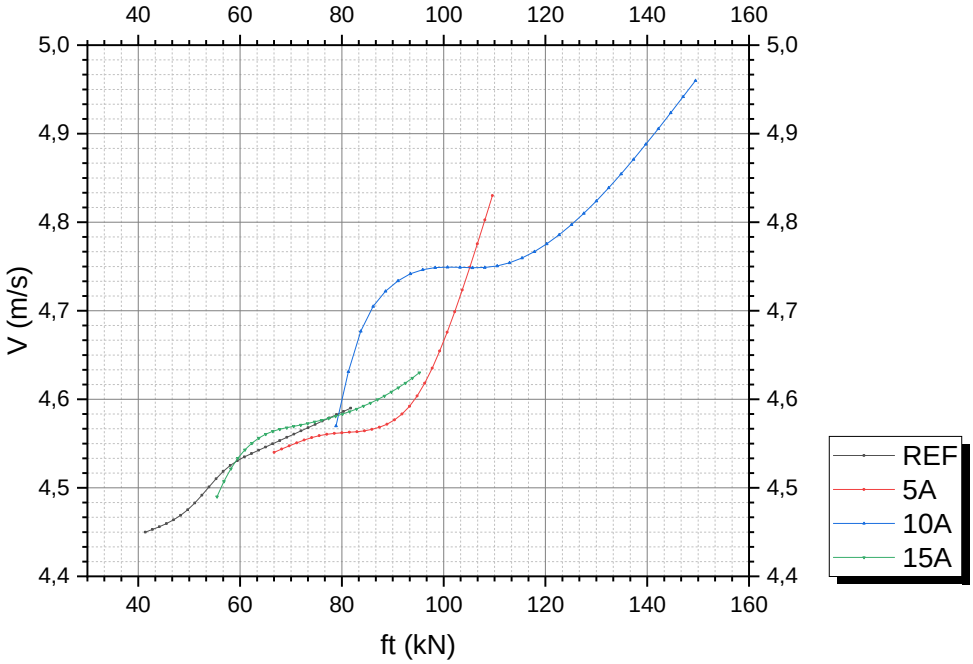
Como visto anteriormente outro parâmetro que mede a qualidade do concreto é a velocidade de propagação das ondas de ultrassom, conforme a tabela da Figura 4.16, quanto maior esta leitura for, maior será também a qualidade do concreto, sendo então realizada a correlação desta velocidade com as cargas de ruptura de compressão e tração dos corpos de prova, conforme Figura 4.26 e 4.27.

Figura 4.26 –Velocidade de propagação de ondas de ultrassom X Carga de ruptura à compressão



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.27 –Velocidade de propagação de ondas de ultrassom X Carga de ruptura à tração



Fonte: Autor (2023)

Desta forma após estas correlações é notório observar não só a concordância dos resultados obtidos até o presente momento, mas também o impacto da limalha de aço na qualidade do concreto produzido, com a melhora sendo expressiva para a incorporação de 10% de limalha de aço.

Por fim foram comparados os módulos obtidos, sendo estes, o módulo dinâmico com auxílio de *Sonelastic*, através da leitura da velocidade de propagação de ondas de ultrassom, o módulo estático do concreto obtido pela curva tensão por deformação específica e obtido através da relação encontrada no manual do software *Sonelastic*, conforme equação 4.3 abaixo:

$$E_C = K.\rho^{-1}.E_d{}^{1,4} \tag{4.3}$$

em que: E_d = Módulo dinâmico obtido no ensaio com *Sonelastic* (Pa)

k = Constante no valor de 0,107;

ρ = Massa específica do concreto (kg/m³);

E_C = Módulo de elasticidade estático (Pa)

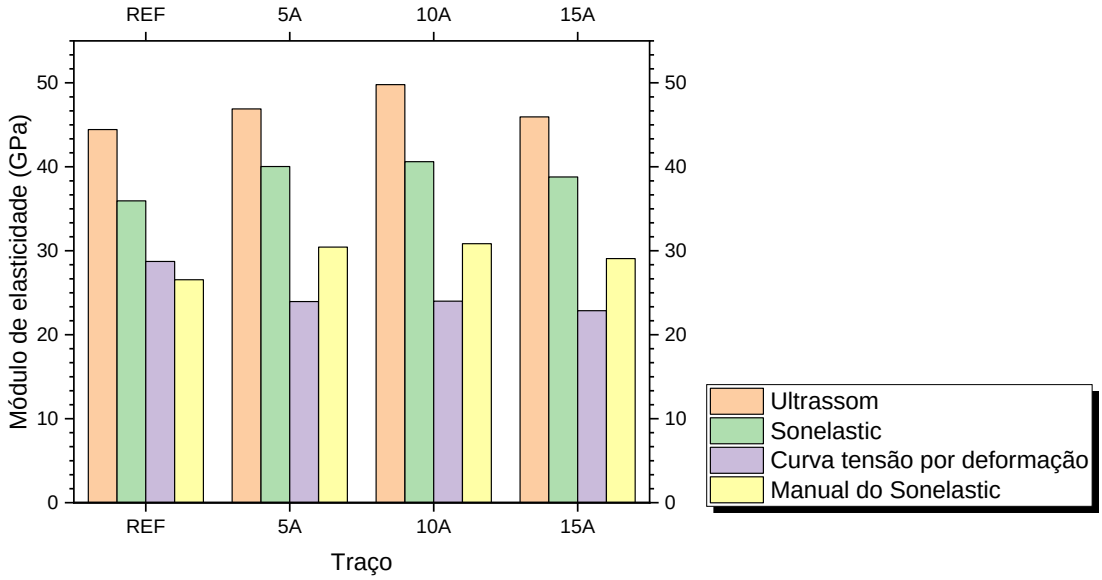
Os valores utilizados pelo gráfico da Figura 4.28 abaixo estão contidos na Tabela 4.17:

Tabela 4.17 –Módulos de elasticidade obtidos para as substituições de agregados miúdos

Traço	Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)	Módulo de elasticidade dinâmico (Sonelastic)	Módulo de elasticidade (Curva)	Módulo de elasticidade estático (Manual)
REF	44,44	35,94	28,73	26,55
5A	46,86	40,03	23,95	30,44
10A	49,79	40,61	24,00	30,84
15A	45,95	38,79	22,87	29,08

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.28 –Módulos de elasticidade obtidos para as substituições de agregados miúdos



Fonte: Autor (2023)

Os maiores valores para o módulo dinâmico foram obtidos pelo ultrassom, é válido notar que apesar dos valores obtidos pela metodologia do *Sonelastic* serem menores, a variação deste parâmetro nos traços com incorporação em relação ao de referência se manteve muito próxima entre os dois métodos.

O módulo estático no geral se mostrou superior pelos cálculos, com a variação obtida entre os traços com limalha de aço nas duas metodologias também semelhante, sendo que, pela curva os valores demonstraram maior segurança.

4.4.1.8 Análise dos corpos de prova após imersão em solução agressiva

Para estes resultados serão adotadas duas nomenclaturas, a primeira “TX – Atacado”, referente aos corpos de prova que passaram 180 dias submersos em solução agressiva, e “TX -

Referência" para os que foram rompidos após o mesmo período com cura em câmara úmida, com "X" representando a numeração da família de traço (de 01 a 10) conforme apresentado até o momento. O módulo dinâmico da referência foi averiguado aos 28 dias.

Foram realizadas duas comparações de propriedades, a primeira dos traços "atacados" com os de referência da mesma família, por exemplo "10A - Atacado" com "10A – Referência", e da resistência à compressão dos traços submersos em solução agressiva com incorporação de limalha de aço em relação ao traço de referência também submerso, ou seja, "5A, 10A e 15A – Atacados" com "REF – Atacado".

As considerações e nomenclatura apresentadas até o momento neste capítulo também foram adotadas para as substituições de agregados graúdos e de fibras por limalha de aço.

Com relação as alterações de massa dos corpos de prova, antes e após a imersão, não foram averiguadas em nenhuma solução e traço, alterações estatisticamente significativas entre as amostras, sendo possível afirmar que, a imersão em soluções agressivas não alterou de maneira considerável a massa dos concretos analisados, as variações encontradas estão presentes na Tabela 4.18 abaixo.

Tabela 4.18 – Variações das massas dos corpos de prova – Antes e após imersão (substituição de agregado miúdo)

	Variações das massas dos corpos de prova			
	REF	5A	10A	15A
Solução de 5% de sulfato de sódio	4,71%	1,47%	-0,26%	2,14%
Solução de 10% de sulfato de sódio	4,06%	3,50%	0,39%	2,11%
CP - Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de	6,41%	2,92%	0,06%	3,13%

Fonte: Autor (2023)

Assim como a massa não foram registradas alterações significativas nas dimensões dos corpos de prova, tendo valor máximo de aumento de 0,75 mm de diâmetro no traço "10A" na solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio, e diminuição máxima de 0,6 mm na altura do traço "5A" também na mesma solução, com a maior parte dos corpos de prova mantendo suas dimensões originais.

Os resultados das propriedades mecânicas serão apresentados nos tópicos seguintes divididos por solução

4.4.1.8.1 Solução de 5% de sulfato de sódio – Propriedades mecânicas

Os valores médios obtidos das propriedades mecânicas dos traços atacados estão contidos na Tabela 4.19. juntamente com a variação destes valores em relação aos traços de referência.

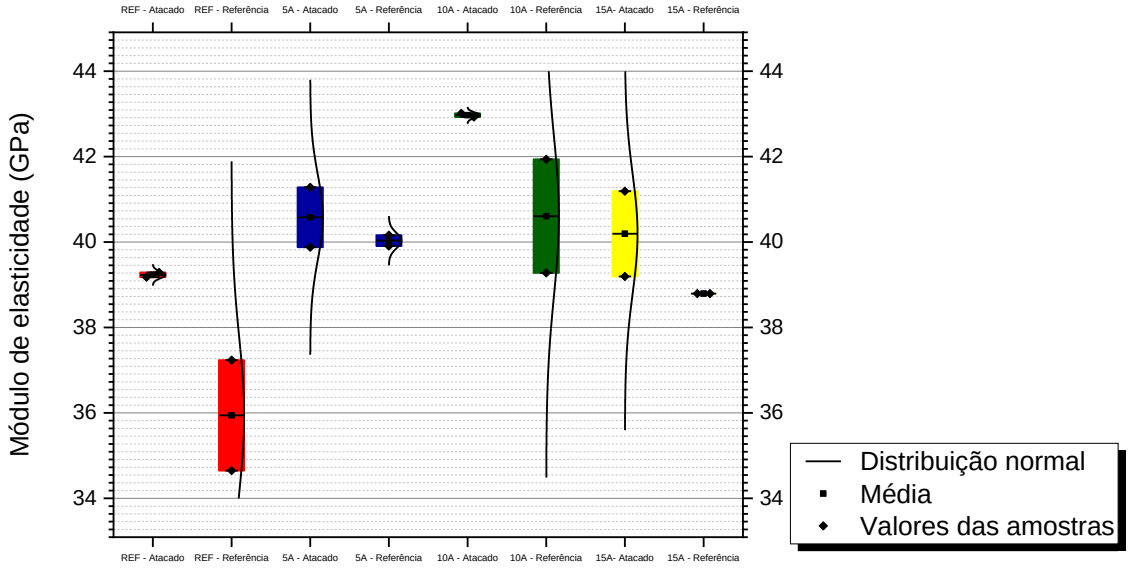
Tabela 4.19 – Propriedades mecânicas – 5% de sulfato de sódio (substituição de agregado miúdo)

	CP - Solução de 5% de sulfato de sódio			
	REF	5A	10A	15A
Resistência à compressão (180 Dias)	26,42	20,62	29,96	28,25
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	46,82	49,99	45,82	44,26
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	39,23	40,58	36,00	38,71
	CP - Referência			
	REF	5A	10A	15A
Resistência à compressão (180 Dias)	28,16	30,05	31,97	27,14
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	43,19	44,64	49,36	44,11
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	35,94	40,03	40,61	38,79
	Variações entre "Atacados" com "Referência"			
	REF	5A	10A	15A
Resistência à compressão (180 Dias)	-6,17%	-31,38%	-6,29%	4,09%
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom	8,41%	11,98%	-7,17%	0,34%
Módulo de elasticidade dinâmico - Sonelastic	9,15%	1,37%	-11,35%	-0,21%

Fonte: Autor (2023)

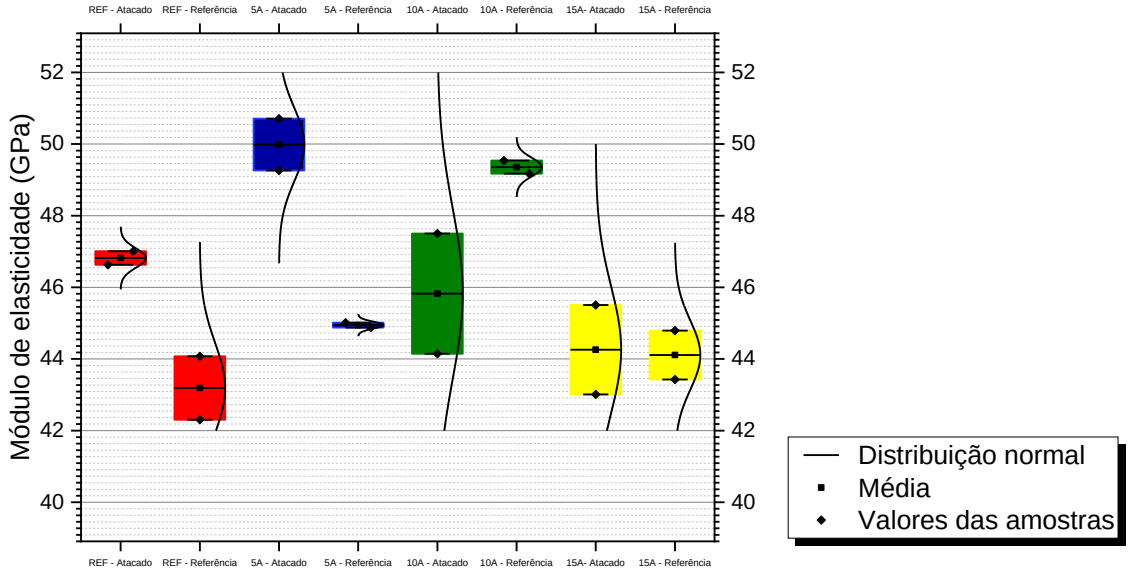
Os valores amostrais obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico através do ensaio de ultrassom e do *Sonelastic* podem ser observados no gráfico representado na Figura 4.29 e 4.30.

Figura 4.29 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.30 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)



Fonte: Autor (2023)

As variações obtidas pelas duas metodologias se mostraram semelhantes, a diminuição vista no traço “10A” representa a atuação desta solução na durabilidade do concreto, diminuindo este parâmetro com o tempo maneira mais expressiva nesta solução, enquanto para 15% não ocorreram variações significativas deste parâmetro,

Para o traço de referência e o de 5% de incorporação, o aumento no módulo representa

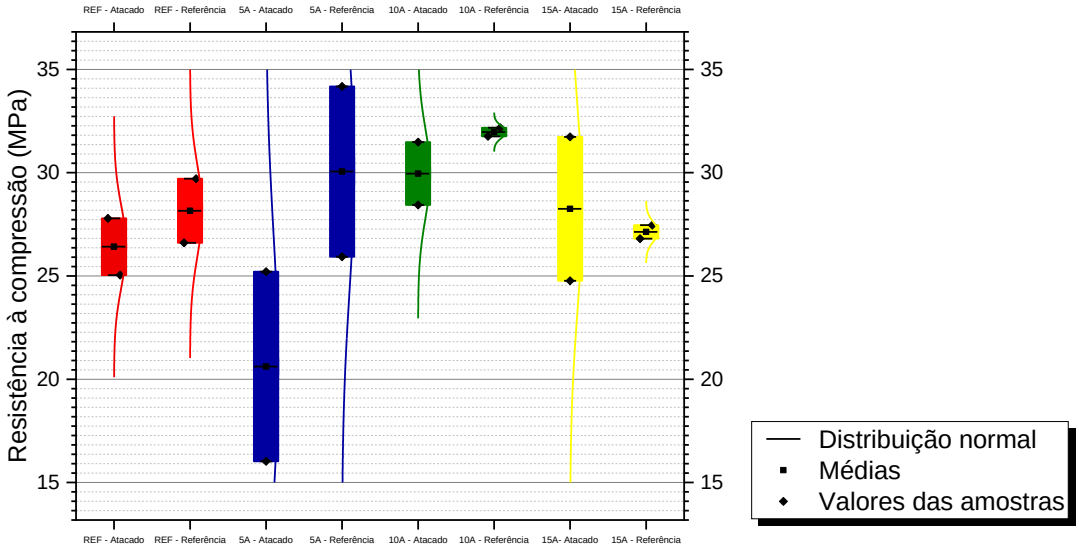
pouco ou nenhum efeito de degradação com o tempo, já que o aumento deste parâmetro com o avanço da idade é algo esperado.

A resistência à compressão do concreto foi diminuída nos traços “REF”, “5A” e “10A”, onde, quanto maior a redução maior também é a atuação da solução na durabilidade do concreto. É visto que a redução em “5A” é expressivamente superior a ocorrida no traço de referência, ou seja, a solução de 5% de sulfato de sódio, ocasiona uma redução da resistência superior ao visto no concreto convencional, implicando em uma maior agressividade a qual pode estar atrelada a distribuição dos resíduos no concreto, já a incorporação de 10%, a alteração da resistência se deu semelhante ao visto no traço “REF”, logo a solução degradou de maneira semelhante ambos os traços.

O traço “15A” apesar de demonstrar uma variação positiva da resistência, com análise de variância de média é possível concluir que estatisticamente a amostra atacada pertence a de referência, ou seja, a solução não apresentou influência na resistência à compressão em teores de 15 % de substituição.

Os valores amostrais obtidos estão contidos na Figura 4.31 abaixo:

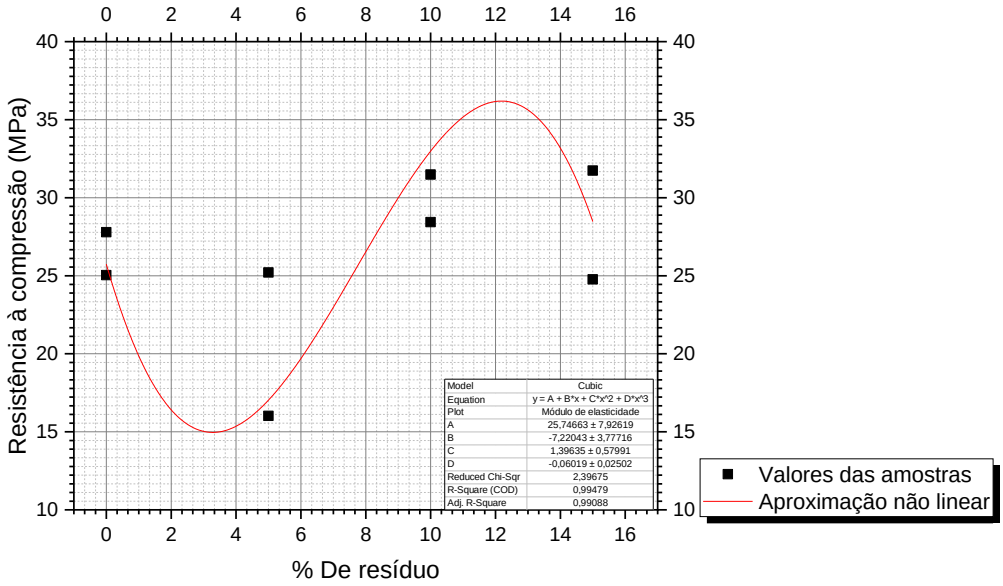
Figura 4.31 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Resistência à compressão



Fonte: Autor (2023)

Foi realizada a aproximação não linear da resistência à compressão do concreto por teor de incorporação utilizando os dados obtidos dos corpos de prova atacados, a fim, de comparar com a curva obtida na Figura 4.12 anteriormente, o fator R^2 obtido foi de 0,99474, e a curva está representada abaixo na Figura 4.32:

Figura 4.32 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de agregado miúdo) – Solução de 5% de sulfato de sódio



Fonte: Autor (2023)

Assim como para os corpos de prova aos 28 dias, o formato da curva se deu semelhante, é possível observar que a limalha de aço mesmo sofrendo degradação por solução química, para alguns teores, continua aumentando a resistência à compressão do concreto, com teor máximo de melhora de 10 a 12%.

Em resumo, o comportamento mecânico de cada traço de concreto imerso na solução de 5% de sulfato de sódio foi:

- REF (0%): Aumento no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco ou nenhum efeito da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão;
- 5A (5%): Aumento no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco ou nenhum efeito da solução neste parâmetro; maior diminuição da resistência à compressão;
- 10A (10%): Diminuição no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, sendo este o traço com maior efeito da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão semelhante ao traço “REF”, demonstrando o mesmo nível de degradação do concreto convencional;
- 15A (15%): Pouca variação no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco efeito da solução neste parâmetro; nenhuma variação na resistência à compressão do concreto.

4.4.1.8.2 Solução de 10% de sulfato de sódio – Propriedades mecânicas

Os valores médios das propriedades mecânicas estão representados na Tabela 4.20, bem como as variações obtidas para cada.

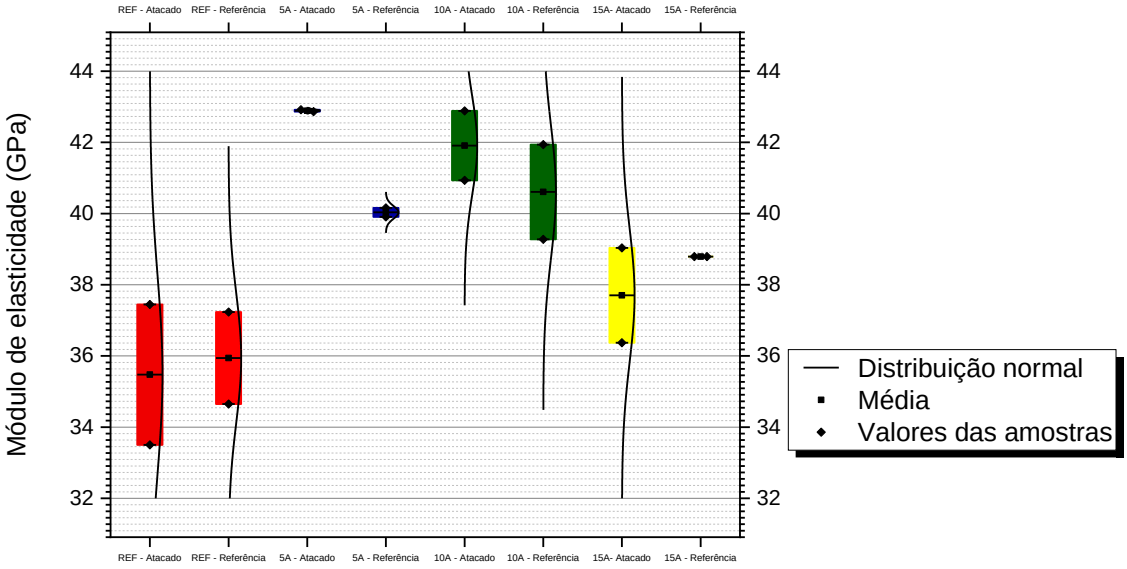
Tabela 4.20 – Propriedades mecânicas (substituição de agregado miúdo) – 10% de sulfato de sódio

	CP - Solução de 10% de sulfato de sódio			
	REF	5A	10A	15A
Resistência à compressão (180 Dias)	14,27	22,59	20,71	19,94
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	43,10	51,29	48,79	45,47
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	35,48	42,89	41,91	36,22
	CP - Referência			
	REF	5A	10A	15A
Resistência à compressão (180 Dias)	28,16	30,05	31,97	27,14
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	43,19	44,64	49,36	44,11
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	35,94	40,03	40,61	38,79
	Variações entre "Atacados" com "Referência"			
	REF	5A	10A	15A
Resistência à compressão (180 Dias)	-49,32%	-24,83%	-35,22%	-26,53%
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom	-0,21%	14,90%	-1,15%	3,08%
Módulo de elasticidade dinâmico - Sonelastic	-1,29%	7,14%	3,20%	-6,63%

Fonte: Autor (2023)

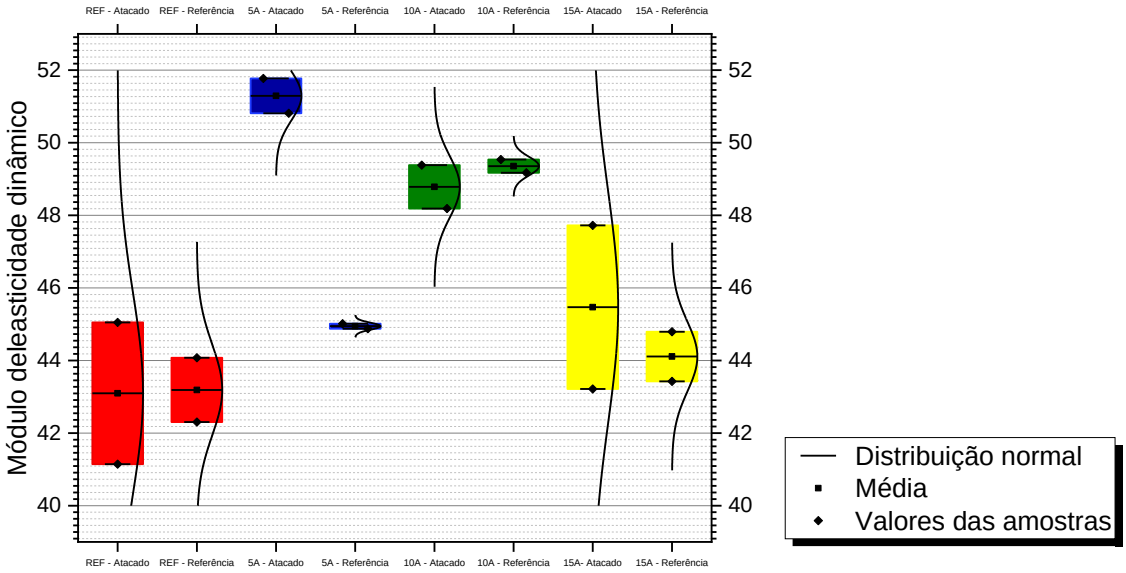
Os valores amostrais obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico através do ensaio de ultrassom e do *Sonelastic* estão representados pelo gráfico da Figura 4.33 e 4.34.

Figura 4.33 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.34 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)



Fonte: Autor (2023)

As variações encontradas no ensaio com ultrassom e *Sonelastic* se mostraram semelhantes para todos os traços, mesmo “10A” apresentando em uma metodologia variação positiva e em outra negativa, é válido notar que ainda sim estão próximas de zero, e a análise estatística de variância de média realizada para estas duas amostras demonstrou que, para ambas as metodologias não há grau de confiabilidade suficiente para afirmar que se tratam de médias diferentes entre os traços atacados

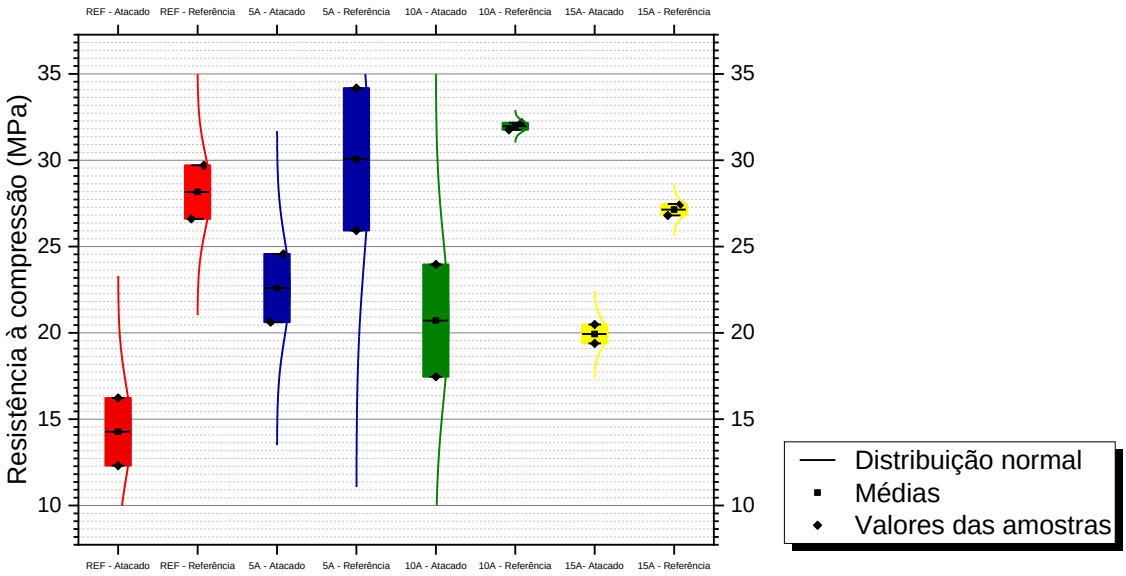
e de referência, ou seja, tanto pelo método do ultrassom como para o do *Sonelastic*, a solução de 10% de sulfato de sódio não alterou significativamente o módulo dinâmico do concreto com 10% e 15% de incorporação de limalha de aço.

Resultado semelhante foi observado no traço de referência, em que, foi constatado estatisticamente a não variação do módulo dinâmico do concreto nesta solução, é válido notar então que, a incorporação de limalha de aço no concreto nos teores 10% e 15% se comportaram de maneira semelhante ao concreto de referência, então para solução de 10% de sulfato de sódio a limalha não aumentou a degradação do concreto com relação ao módulo de elasticidade dinâmico. Este parâmetro ainda foi aumentado para o teor de 5%, indicando novamente que a limalha não ocasionou o aumento da degradação do concreto nestas proporções, com a solução apresentando pouco efeito no concreto.

A resistência a compressão do concreto foi diminuída para todos os traços, porém a maior diminuição está presente no concreto de referência, sendo o que mais sofreu decréscimo da resistência para esta solução, assim sendo, a limalha de aço além de não aumentar a degradação do concreto frente a esta solução também auxiliou na amenização do efeito desta solução na redução da resistência à compressão do concreto.

Os valores amostrais estão contidos na Figura 4.35 abaixo:

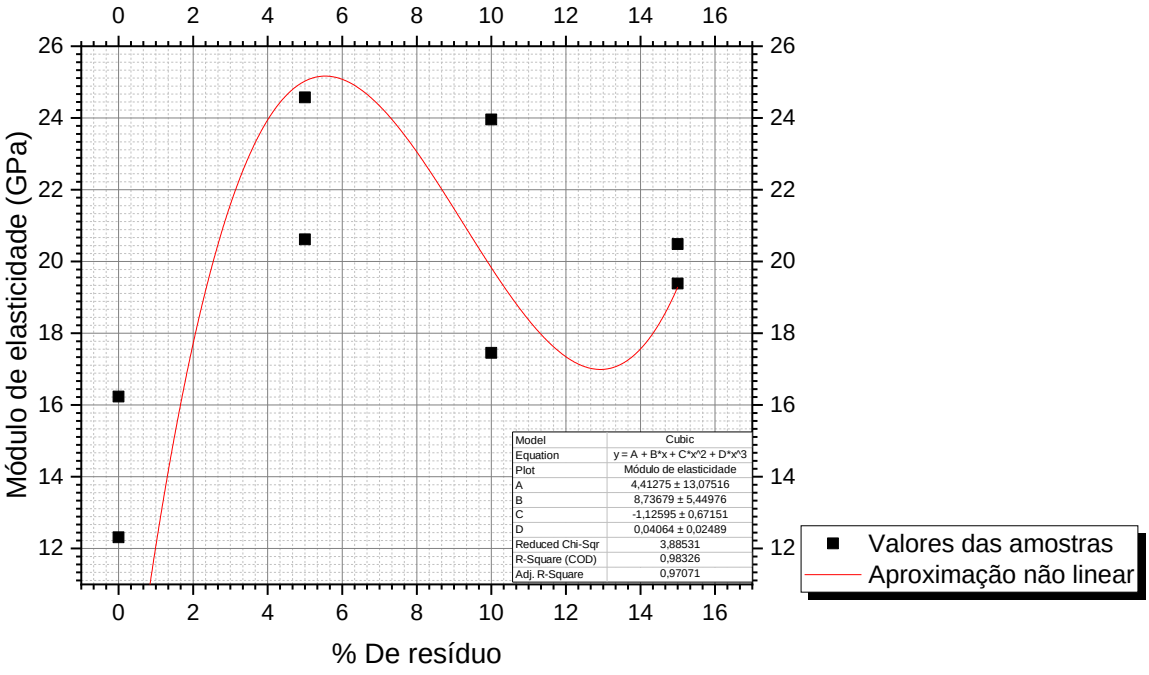
Figura 4.35 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Resistência a compressão



Fonte: Autor (2023)

Novamente foi realizada a aproximação não linear, obtendo fator R^2 de 0,98326, de acordo com a Figura 4.36 abaixo.

Figura 4.36 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de agregado miúdo) – Solução de 10% de sulfato de sódio.



Fonte: Autor (2023)

É observado que o teor ótimo foi reduzido para 5%, indicando que o traço de 10% acabou se mostrando mais sensível à solução de 10% de sulfato de sódio se comparado aos traços “5A” e “15A”.

Em resumo, o comportamento mecânico de cada traço de concreto imerso na solução de 10% de sulfato de sódio foi:

- REF (0%): Pouca variação no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco efeito da solução neste parâmetro; maior diminuição da resistência à compressão;
- 5A (5%): Aumento no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco ou nenhum efeito da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão;
- 10A (10%): Pouca variação no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco efeito da solução neste parâmetro; incorporação de limalha com a maior diminuição da resistência à compressão;
- 15A (15%): Pouca variação no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco efeito da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão.

4.4.1.8.3 Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio – Propriedades mecânicas

Os valores médios obtidos das propriedades mecânicas dos traços atacados estão contidos na Tabela 4.21 também juntamente com a variação destes valores em relação aos traços de referência.

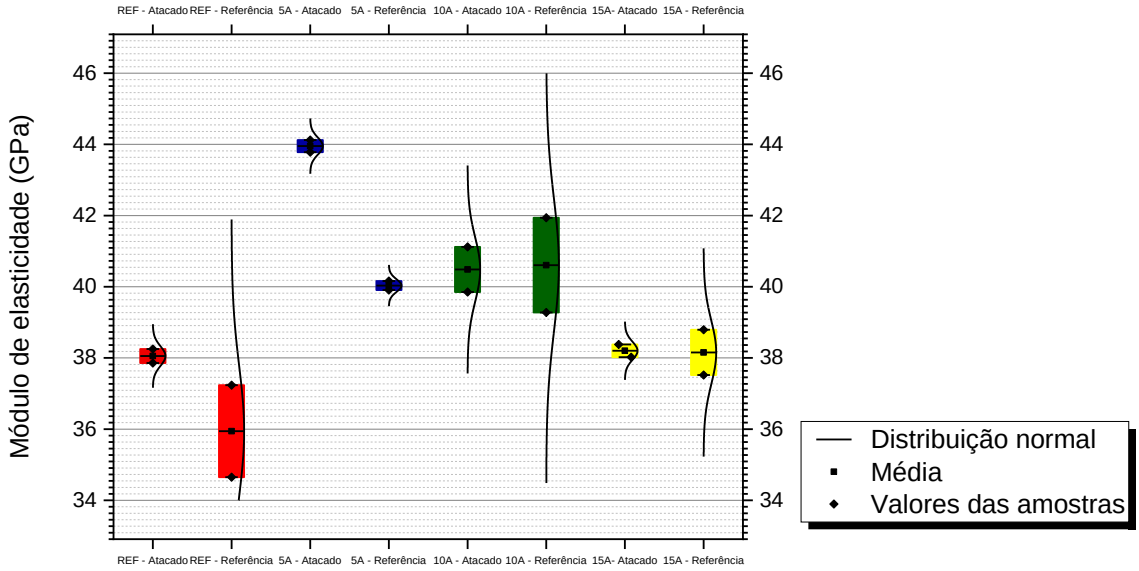
Tabela 4.21 – Propriedades mecânicas (substituição de agregado miúdo) – 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio

	CP - Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% cloreto de sódio			
	REF	5A	10A	15A
Resistência à compressão (180 Dias)	18,65	20,50	27,01	21,84
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	48,41	49,44	46,38	44,60
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	38,05	43,95	40,49	38,20
	CP - Referência			
	REF	5A	10A	15A
Resistência à compressão (180 Dias)	28,16	30,05	31,97	27,14
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	43,19	44,64	49,36	44,11
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	35,94	40,03	40,61	38,79
	Variações entre "Atacados" com "Referência"			
	REF	5A	10A	15A
Resistência à compressão (180 Dias)	-33,76%	-31,78%	-15,51%	-19,53%
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom	12,09%	10,75%	-6,04%	1,11%
Módulo de elasticidade dinâmico - Sonelastic	5,87%	9,79%	-0,30%	-1,52%

Fonte: Autor (2023)

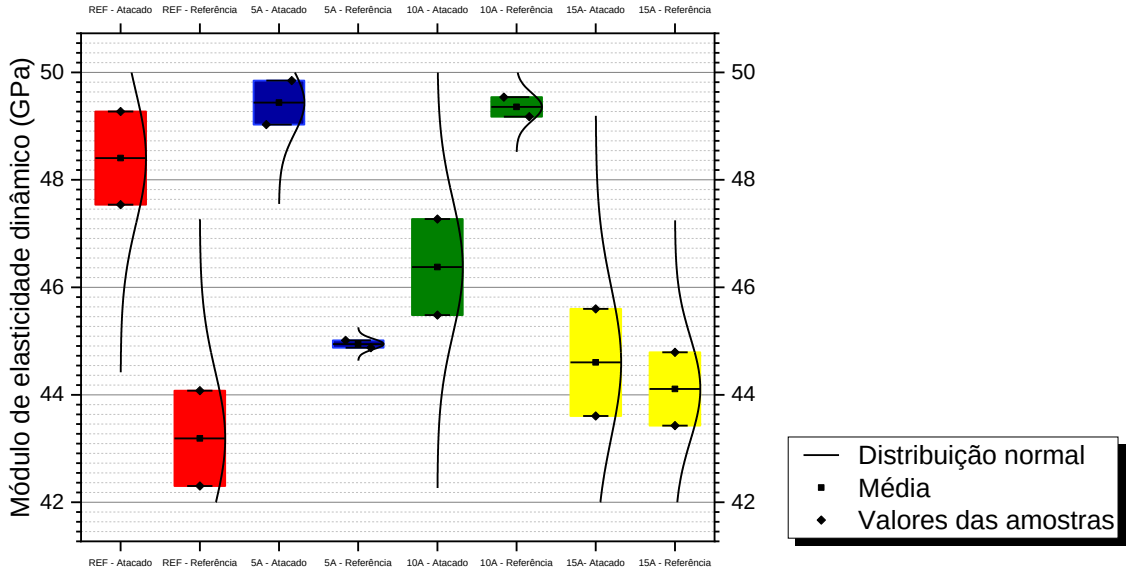
Os valores de cada amostra para o módulo de elasticidade dinâmico através do ensaio de ultrassom e do *Sonelastic* podem ser observados no gráfico representado na Figura 4.37 e 4.38.

Figura 4.37 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.38 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)



Fonte: Autor (2023)

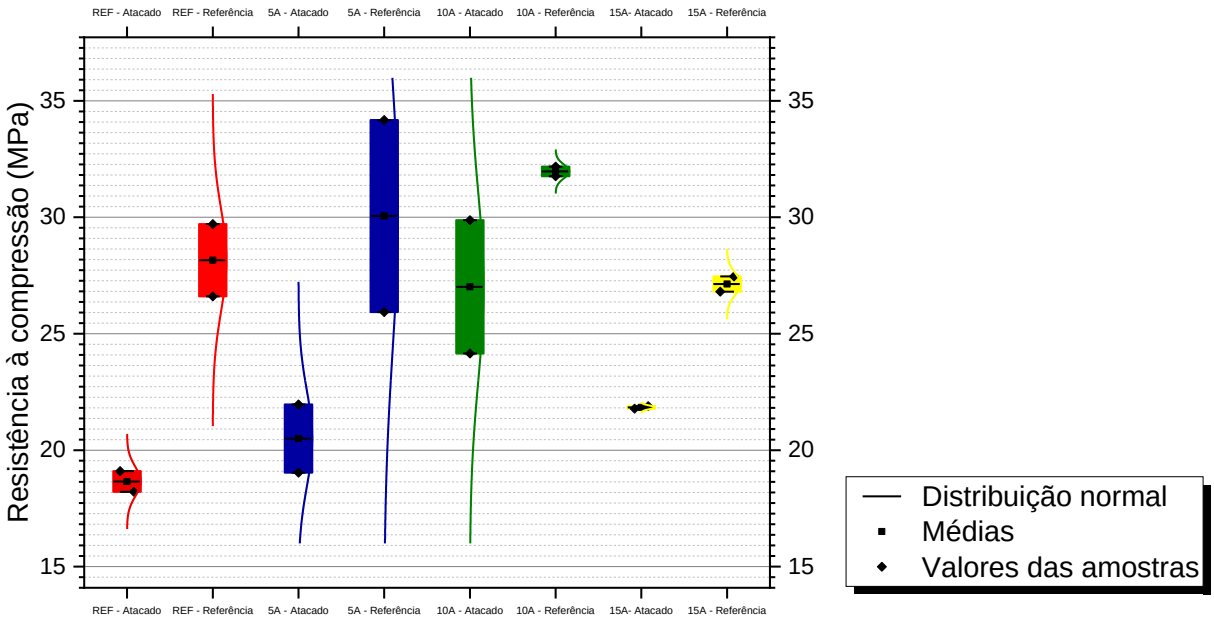
O método do ultrassom demonstrou variações maiores para o módulo de elasticidade, porém ainda sim, tanto esta metodologia como a do *Sonelastic* mostraram concordâncias entre os resultados, com o traço “REF” e “5A” possuindo aumentos, “10A” reduzindo este parâmetro e “15A” não apresentando variação estatisticamente significativa.

A resistência a compressão do concreto sofreu reduções em todas as incorporações, com

maior valor no traço sem limalha de aço, demonstrando novamente assim como visto para a solução de 10% sulfato de sódio, que a limalha de aço não aumentou a degradação do concreto nesta solução, podendo estar amenizando o efeito. Considerando a variação de resistência dentre as incorporações, a substituição de 5% de limalha proporcionou a menor queda deste parâmetro.

Os valores das amostras estão representados na Figura 4.39:

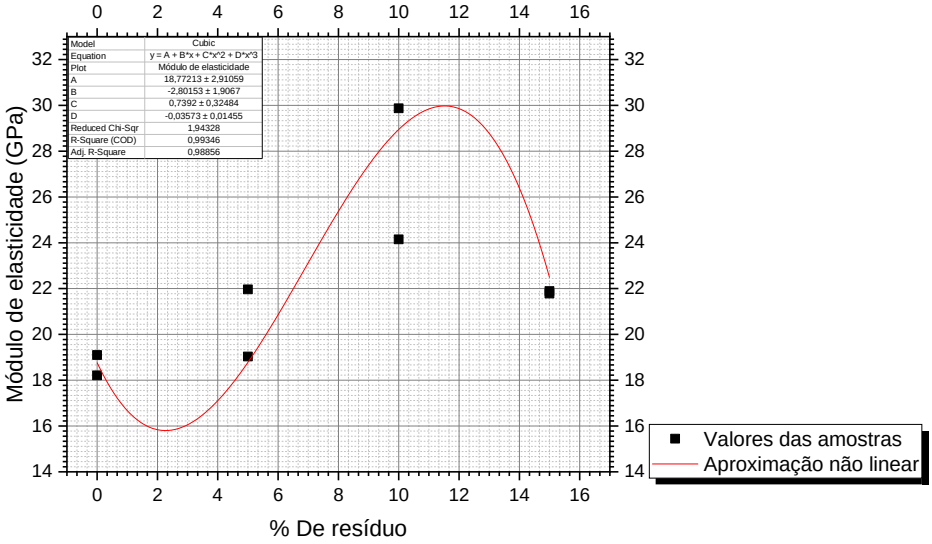
Figura 4.39 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado miúdo) – Resistência a compressão



Fonte: Autor (2023)

A aproximação não linear foi realizada também para os traços desta solução, obtendo fator R^2 de 0,99346, conforme Figura 4.40

Figura 4.40 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de agregado miúdo) – Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio



Fonte: Autor (2023)

Assim como para os corpos de prova aos 28 dias, o formato da curva se deu semelhante, é possível observar que a limalha de aço continua apresentando acréscimo na resistência à compressão do concreto, com teor máximo de melhora em 10 a 12%, assim como o visto anteriormente nos ensaios de resistência à compressão aos 28 e 91 dias.

Em resumo o comportamento mecânico de cada traço para a solução de 5% de sulfato de sódio com 3% de sulfato de sódio foi:

- REF (0%): Aumento no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco ou nenhum efeito da solução neste parâmetro; maior diminuição da resistência à compressão;
- 5A (5%): Aumento no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco ou nenhum efeito da solução neste parâmetro; incorporação de limalha com a maior diminuição da resistência à compressão, porém ainda o traço de referência possui uma redução superior.;
- 10A (10%): Diminuição no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando em efeito da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão;
- 15A (15%): Pouca variação no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco efeito da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão.

4.4.1.8.4 Considerações gerais dos resultados do ensaio de imersão

Com os resultados obtidos em todos os ensaios para todos os traços, é possível afirmar que a limalha de aço não prejudicou a durabilidade do concreto imerso em soluções agressivas em idades de 180 dias, a degradação ocorreu em todos os traços, porém em alguns casos a presença de resíduo amenizou o efeito das soluções em alguns casos, principalmente com relação a resistência à compressão, sendo esta propriedade ainda se mostrando superior em teores de 10% a 12%.

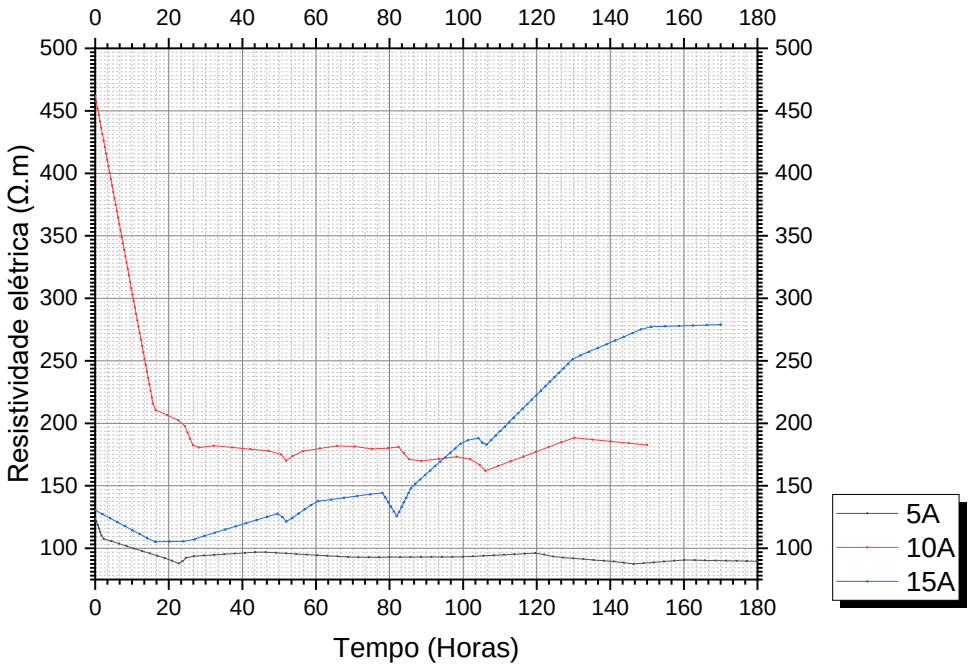
4.4.1.9 Resistividade elétrica

Os valores da resistividade elétrica do concreto foram medidos a cada 12 horas no máximo e apenas para os traços contendo limalha de aço, sendo assim a comparação será feita entre os traços com substituições, uma vez que, a captação da resistividade elétrica do concreto convencional não se mostrou efetiva.

Com as medições utilizando o multímetro nesta metodologia, não é possível captar valores de corrente elétrica em idades pouco avançadas no concreto convencional, sendo possível o registro em tempos maiores, porém aspectos ambientais tais como temperatura e umidade poderiam influenciar expressivamente os valores obtidos conforme maior o tempo utilizado no ensaio, sendo então o ideal para o concreto convencional isolamento térmico e de umidade, considerando a necessidade de maiores períodos para as leituras, estas considerações também são válidas para as substituições de agregados graúdos.

Os valores obtidos de resistividade elétrica pelo tempo estão contidos no gráfico representado na Figura 4.41.

Figura 4.41 – Resistividade elétrica por tempo – Substituições de agregados miúdos



Fonte: Autor (2023)

De acordo com revisão de literatura a respeito do tema, a resistividade do concreto convencional possui valores da ordem de 10 a 1000 ohm.metro, variando de acordo com a temperatura, umidade, saturação, qualidade do concreto, tipos de agregados, entre outros. É observado que, todos os traços contendo limalha de aço possuem valores entre este intervalo.

O resíduo de usinagem não prejudicou a resistividade elétrica do concreto, com os traços de 10% e 15% obtendo os maiores valores, conforme apresentado anteriormente estes teores também foram o que apresentaram maior qualidade do concreto produzido e menor índices de vazios, o que influi diretamente na resistividade elétrica, já que, estas duas características estão diretamente relacionadas com a dificuldade da passagem de corrente pelo concreto.

4.4.2 Substituição do agregado graúdo por limalha

4.4.2.1 Absorção de água, índice de vazios e massas específicas

Da mesma forma como observado para as substituições de agregado miúdo, a absorção de água reduziu conforme o aumento da incorporação de limalha de aço, obtendo reduções de 8,8%, 21,9% e 22,6% para os teores de 5%, 10% e 15%. É interessante notar que, para as incorporações elevadas o desvio padrão obtido foi inferior não apenas a 5% de substituição

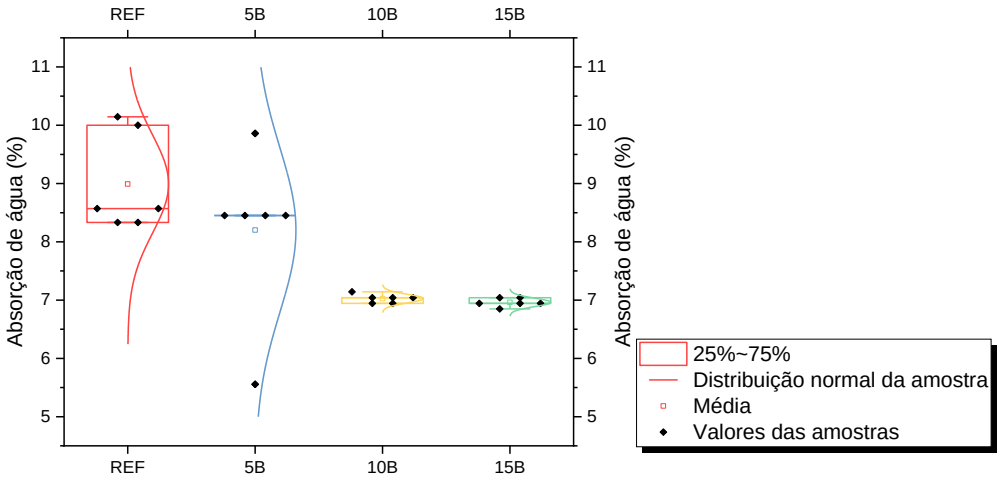
como também ao traço de referência, conforme visto no gráfico da Figura 4.42 e valores da Tabela 4.22:

Tabela 4.22 – Absorção de água das substituições de agregado graúdo

Absorção de água		
Traço	Absorção de água	Variação em relação a referência
REF	8,99%	-
5B	8,20%	-8,78%
10B	7,03%	-21,86%
15B	6,96%	-22,59%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.42 – Absorção de água das substituições de agregado graúdo

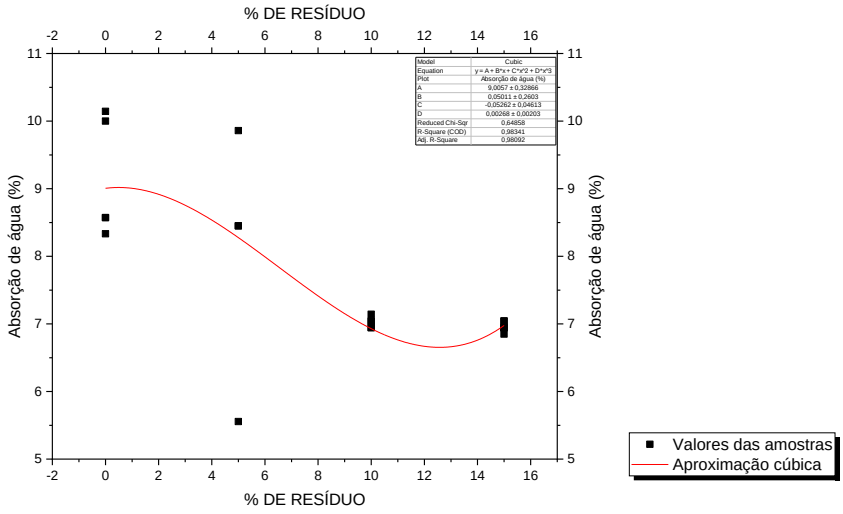


Fonte: Autor (2023)

Conforme análise estatística realizada, exceto a incorporação de 5% (com confiabilidade de apenas 70%), as amostras de 10% e 15% possuem médias diferentes em relação ao traço base com confiabilidade de 95%, para estes teores então é possível afirmar com este grau de precisão que houve a redução da absorção de água.

A aproximação não linear realizada possui fator R^2 ajustado de 0,98341, sendo válida apenas para as faixas de estudo realizadas, é demonstrada pela Figura 4.43.

Figura 4.43 – Absorção de água por teor de substituição de agregado graúdo



Fonte: Autor (2023)

Pela curva traçada é possível determinar que substituições entre 12% e 13% tendem uma maior redução da absorção de água pelo concreto.

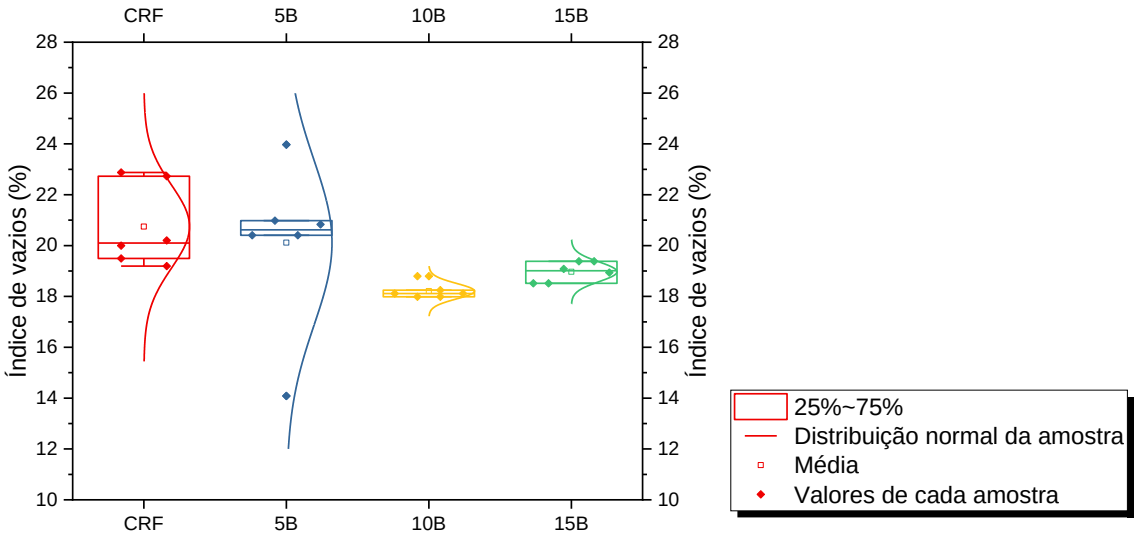
Assim como para a absorção de água, o índice de vazios também apresentou reduções em todas as incorporações na ordem de 8,8%, 12,2% e 8,6% nos teores de 5%, 10% e 15% respectivamente, os valores obtidos são mostrados no gráfico da Figura 4.44 e na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 – Índice de vazios das substituições de agregado graúdo

Índice de vazios		
Traço	Índice de vazios	Variação em relação a referência
REF	20,75%	-
5B	20,11%	-3,06%
10B	18,21%	-12,24%
15B	18,97%	-8,57%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.44 – Índice de vazios das substituições de agregado graúdo

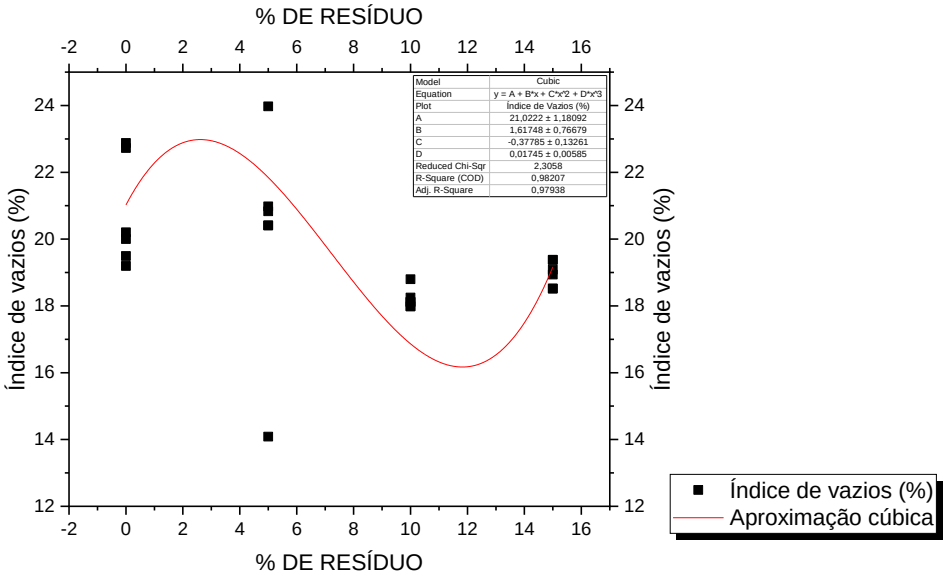


Fonte: Autor (2023)

Conforme a análise estatística realizada, é possível afirmar com confiabilidade de 95% a variância das médias encontradas nos teores de 10% e 15%, sendo assim, para estes teores houve uma redução considerável no índice de vazios presente no concreto e consequente melhor qualidade do material produzido.

O teor que apresentou maior redução no índice de vazios foi determinado através da realização da aproximação não linear da Figura 4.45, com fator R^2 de 0,98207, obtendo-se o valor semelhante ao visto para a absorção de água, na faixa entre 12% e 13%.

Figura 4.45 – Índice de vazios por teor de substituição de agregado graúdo



Fonte: Autor (2023)

As massas específicas obtidas por este ensaio estão mostradas na Tabela 4.24 abaixo. Todos os concretos foram classificados conforme NBR 8953(ABNT, 2015), sendo então considerados como “concreto normal”.

Tabela 4.24 – Massas específicas das substituições de agregado graúdo

Traço	Massa específica seca média	Variação	Massa específica saturada média	Variação	Massa específica real média	Variação
REF	2310,05	0,00%	2517,54	0,00%	2915,18	0,00%
5B	2457,41	6,38%	2658,55	5,60%	3078,84	5,61%
10B	2591,49	12,18%	2773,57	10,17%	3168,57	8,69%
15B	2725,27	17,97%	2914,97	15,79%	3363,60	15,38%

Fonte: Autor (2023)

Todas as massas específicas aumentaram conforme o incremento de limalha de aço também aumentava, obtendo valores máximos na ordem de 15%, estes resultados são esperados, considerando que, a massa específica do aço se mostra superior com relação a da pedra britada.

Althoey e Holsen (2021) substituíram os agregados no agregado e obtiveram também aumento na massa específica do concreto conforme o aumento do teor de incorporação, chegando ao máximo de 5% de acréscimo quando substituído 20% do agregado do concreto, estes aumentos sendo também justificados por conta de a massa específica do aço ser superior a dos agregados utilizados.

4.4.2.2 Resistência a compressão

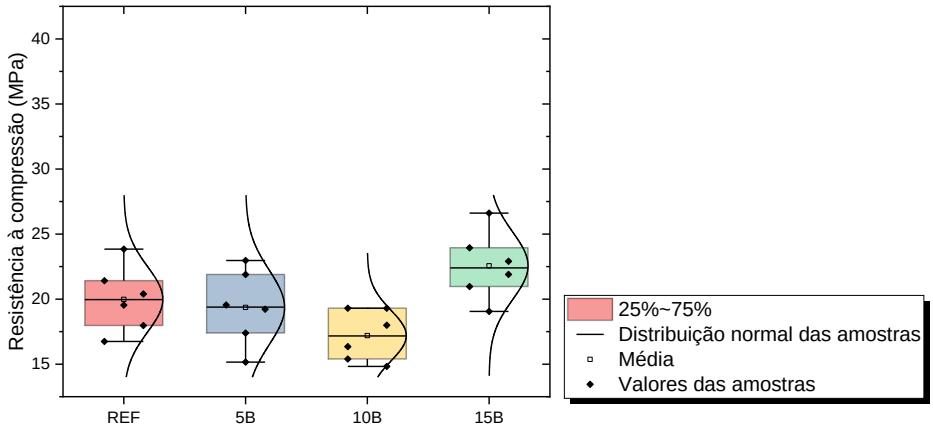
Para a resistência à compressão, com relação ao traço de referência “REF” que obteve 19,98 MPa, foi observada uma redução pouco expressiva de 3,11% deste valor para a incorporação de 5%, para a substituição de 10% a redução foi maior com valor de 13,96%, porém se tratando da incorporação de 15% a resistência aumentou em 12,90%, os valores obtidos estão expressos tanto na Tabela 4.25 como na Figura 4.46.

Tabela 4.25 – Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de agregado graúdo

Resistência à compressão 28 dias		
Traço	Resistência (MPa)	Variação em relação a referência
REF	19,98	-
5B	19,36	-3,11%
10B	17,19	-13,96%
15B	22,56	12,90%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.46 – Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de agregado graúdo



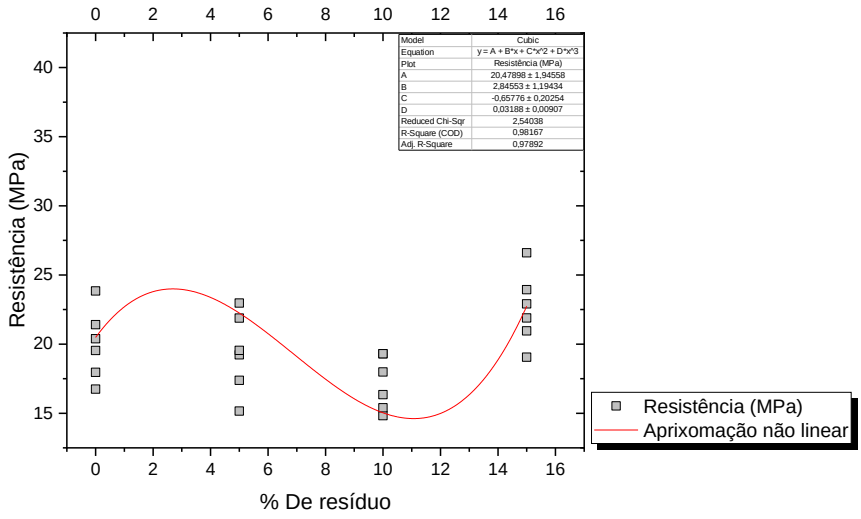
Fonte: Autor (2023)

De acordo com a análise ANOVA realizada, a variação da média de “REF” para “5B” não obteve grau de confiabilidade considerável, sendo inferior a 50%, de maneira geral se tratando de resistência a compressão, adicionar 5% de limalha de aço em relação ao peso de cimento como substituição ao agregado graúdo gera um concreto semelhante ao convencional.

Com relação as amostras “10B” e “15B” em comparação com “REF”, ambas obtiveram aproximadamente 90% de grau de confiabilidade de variação da média.

A aproximação não linear foi realizada assim como para o agregado miúdo, foi obtido um fator R^2 de 0,98167, sendo esta curva válida para as faixas de estudo conforme Figura 4.47, é notório a tendência ao aumento da resistência após os 15% de incorporação.

Figura 4.47 – Resistência a compressão em relação ao teor de substituição de agregado graúdo



Fonte: Autor (2023)

Resultados semelhantes foram obtidos por Shukla *et al.* (2013) que para os teores de 6% e 12% em relação ao peso do cimento, acréscimos de 5% e 14% da resistência a compressão, demonstrando a maior tendência do aumento da resistência após o teor de 10%, e acréscimos menores para teores entre 0% e 10%.

Sheika e Reza (2020) obtiveram para o teor de 15% um acréscimo de 28,4%, sendo estudado por estes o teor de 20% também em que o aumento foi de 35,9%, demonstrando a tendência de aumento de resistência para os teores superiores a 10% citada anteriormente.

Sendo assim, conforme observado por esta pesquisa e outras, a resistência do concreto tende a aumentar após o teor de 10%, sendo então estudos a partir desta faixa de substituição muito mais interessantes.

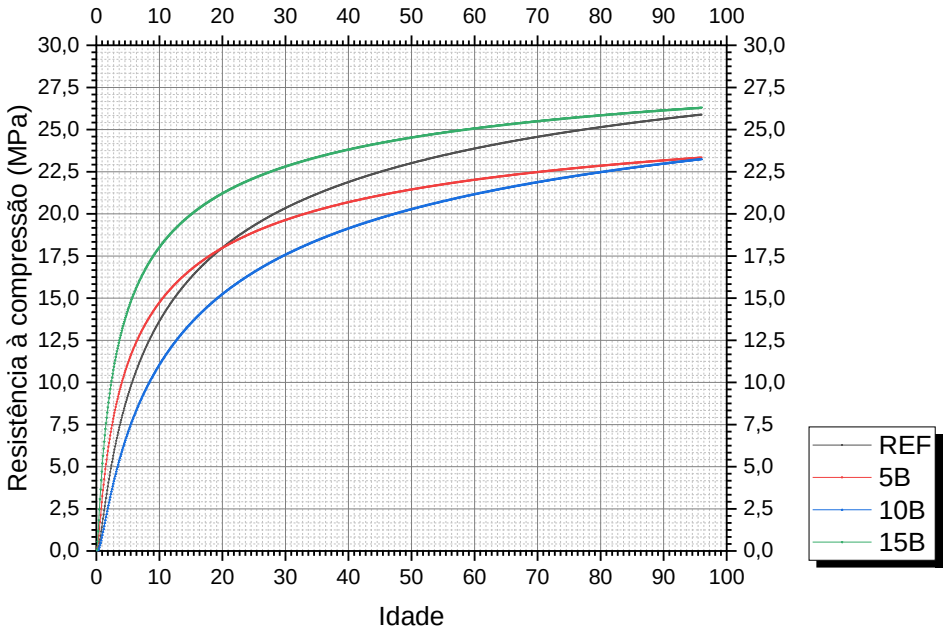
Foi também realizado ensaios para idades de 91 dias, a curva de desenvolvimento da resistência do concreto com a idade foi obtida novamente de acordo com a formulação da NBR6118 (ABNT, 2023), com valores obtidos para R^2 superiores a 0,98, as curvas estão representadas na Figura 4.48 abaixo, enquanto os valores médios dos ensaios está apresentado na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 – Evolução da resistência à compressão para as substituições de agregado graúdo

Resistência à compressão 91 dias		
Traço	Resistência (MPa)	Variação em relação a referência
REF	25,85	-
5B	23,33	-9,73%
10B	23,24	-10,08%
15B	26,31	1,77%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.48 – Evolução da resistência à compressão para as substituições de agregado graúdo



Fonte: Autor (2023)

Com relação aos valores amostrais, após os 96 dias, tanto o traço 5 quanto o 6 obtiveram uma redução um pouco maior na resistência a compressão, de aproximadamente 10% frente ao traço de referência, já o traço 7 ainda apresentou acréscimo na resistência de quase 2%, no geral as amostras apresentaram uma menor variabilidade nos valores da resistência de 28 dias para 91 dias se comparados aos traços 2,3 e 4.

De acordo com o gráfico gerado pela equação normativa é possível observar tendência de equidade da resistência do traço de referência com o traço “15B” com 15% de limalha em idades mais avançadas.

Também é possível observar que com idades mais avançadas a resistência do traço com 10% de limalha tende a superar os valores de “T5”, este com a curva se mantendo aproximadamente paralela ao traço de referência, implicando em um valor aproximadamente fixo de redução de resistência independente do tempo passante.

4.4.2.3 Resistência à tração indireta

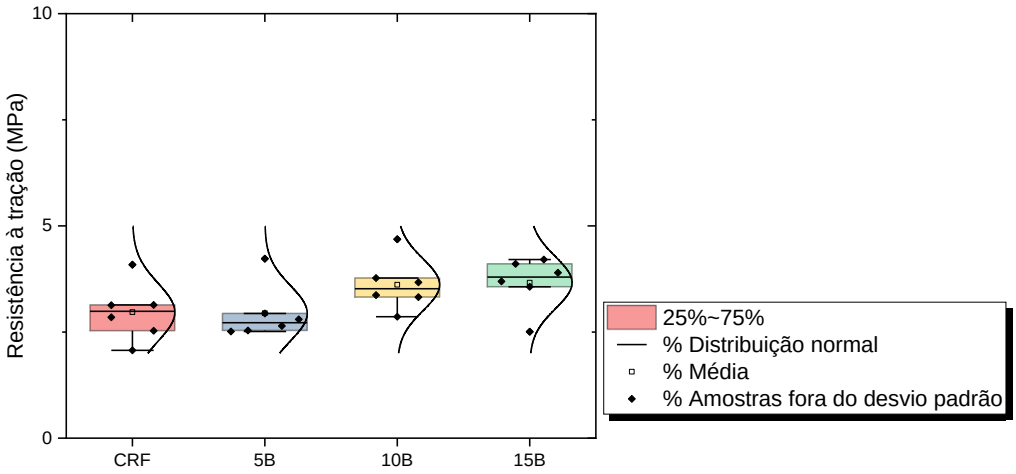
A resistência a tração do concreto foi reduzida em 0,84% para a incorporação de 5%, uma redução pouco considerável, já para os teores de 10% e 15% foi observado o aumento da resistência em 21,80% e 23,44%, conforme apresentado na Figura 4.49 e Tabela 4.27.

Tabela 4.27– Resistência a tração indireta aos 28 dias das substituições de agregado graúdo

Resistência à tração 28 dias		
Traço	Resistência (MPa)	Variação em relação a referência
REF	2,97	-
5B	2,94	-0,84%
10B	3,61	21,80%
15B	3,66	23,44%

Fonte: Autor (2023).

Figura 4.49 – Resistência a tração indireta aos 28 dias das substituições de agregado graúdo



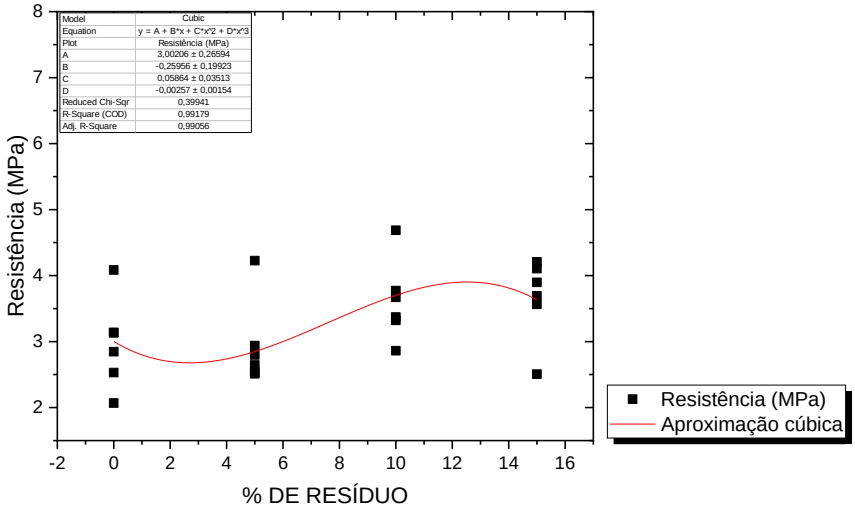
Fonte: Autor (2023).

A análise estatística não apresentou confiabilidade considerável nas médias da amostra “REF” e “5B”, sendo assim, é possível assumir que, a redução da resistência além de baixa, estatisticamente a incorporação de 5% e o concreto de referência são as mesmas amostras, assim como observado também na compressão.

Já as amostras “10B” e “15B” possuíram grau de confiabilidade de quase 90% de diferença das médias em relação ao traço de referência, resultado semelhante ao encontrado na análise de resistência à compressão do concreto.

A aproximação em função cúbica do comportamento do concreto por teor de incorporação é mostrada na Figura 4.50, com fator R^2 de 0,99179.

Figura 4.50 – Resistência a tração em relação ao teor de substituição de agregado graúdo



Fonte: Autor (2023)

De maneira geral, é possível notar que em pequenos teores há a redução da resistência à tração indireta, porém de maneira pouco notória, sendo que, a partir de 6% todas as incorporações tendem a aumentar esta propriedade do concreto, este aumento é esperado justamente pela resistência a tração do aço ser superior à da pedra britada.

Mostofinejad e Kesshavarz (2019) utilizaram as limalhas de aço em substituição ao agregado graúdo em relação ao volume de concreto, obtendo incrementos em todas as incorporações realizadas, com o máximo obtido no valor de 20,69% com a utilização de 1%.

4.4.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico – NBR 8802 (Ultrassom)

Através da medição da velocidade de ondas de ultrassom pelo concreto foi possível determinar seu módulo de elasticidade dinâmico, os valores obtidos neste ensaio estão contidos na Tabela 4.28 abaixo:

Tabela 4.28 – Velocidade das ondas de ultrassom – Substituição de agregado graúdo

Traço	Velocidade de propagação de onda de ultrassom média (km/s)	Variação	Desvio Padrão
REF	4,52	0,00%	0,04
5B	4,56	0,88%	0,03
10B	4,52	-0,07%	0,04
15B	4,51	-0,33%	0,04

Fonte: Autor (2023)

Nota-se ao contrário do visto para o agregado miúdo uma diminuição marginal na velocidade média de propagação da onda de ultrassom, com todos os concretos ainda sendo classificados como excelentes de acordo com a tabela da Figura 4.29, vista anteriormente.

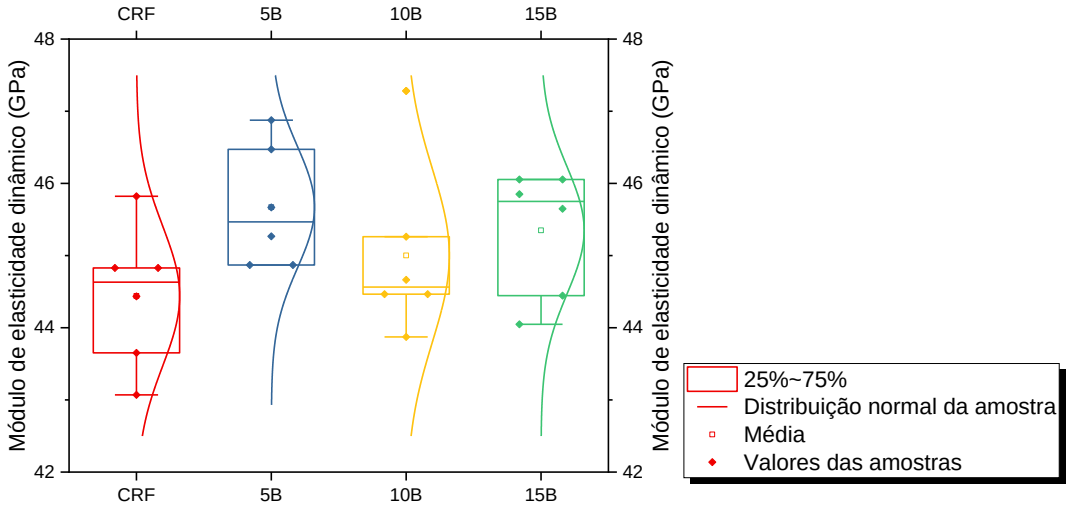
Considerando o módulo de elasticidade dinâmico obtido para o traço de referência como 44,44 GPa, todos os teores apresentaram aumento do módulo de elasticidade nos valores de 2,77%, 1,27% e 2,05% para as incorporações de 5%, 10% e 15% respectivamente. A figura 4.51 demonstra os valores obtidos juntamente com os desvios padrão e distribuição normal das amostras, e a Tabela 4.29 os valores médios amostrais.

Tabela 4.29 – Módulo de elasticidade para cada substituição de agregado graúdo

Módulo de elasticidade por ultrassom		
Traço	Módulo dinâmico (GPa)	Variação em relação a referência
REF	44,44	-
5B	45,67	2,77%
10B	45,00	1,27%
15B	45,35	2,05%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.51 – Módulo de elasticidade para cada substituição de agregado graúdo

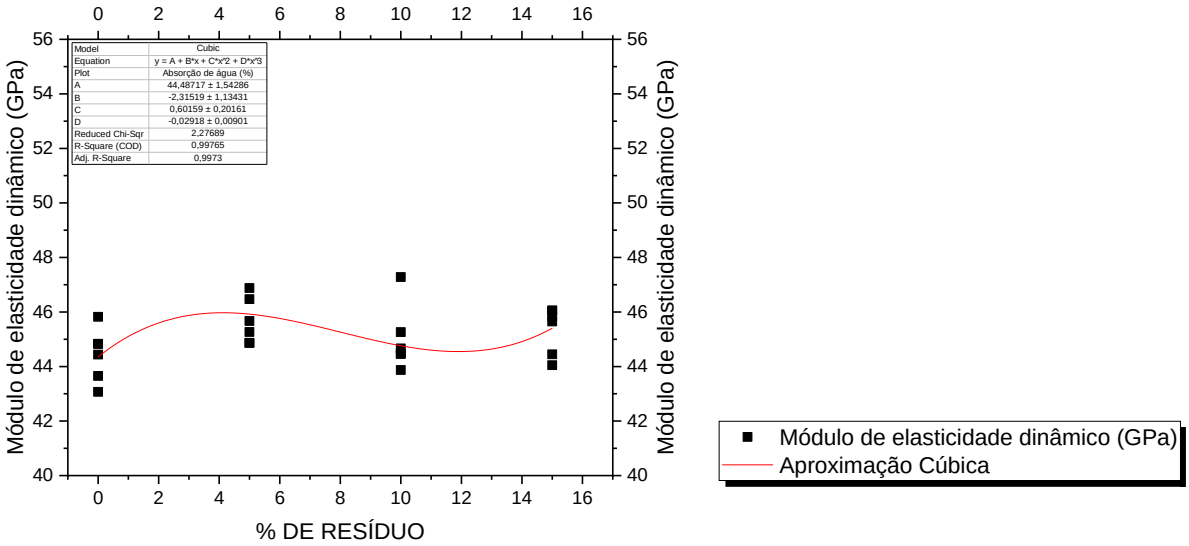


Fonte: Autor (2023)

De acordo com a análise estatística de variância de média realizada, foi obtido 95% de grau de confiabilidade para a diferenciação das médias das amostras “5B”, “10B” e “15B” em relação a “REF”.

A aproximação não linear obtida do módulo por teor de incorporação é vista na Figura 4.52, com fator R^2 de 0,9973, sendo determinado o maior acréscimo nos teores entre 2% e 4%, com uma tendência ao aumento após os 15%.

Figura 4.52 – Módulo de elasticidade dinâmico por teor de substituição de agregado graúdo



Fonte: Autor (2023)

A variação do módulo para o agregado graúdo foi menos significativa se comparado ao agregado miúdo, o que é explicado levando em consideração que, no geral o módulo de elasticidade de agregados graúdos é superior ao de agregados miúdos, porém ainda assim são inferiores ao do aço, o que também justifica o acréscimo em todas as incorporações estudadas.

4.4.2.5 Módulo de elasticidade dinâmico – NBR 8522-2 *(Sonelastic)*

O traço de referência "REF" apresentou módulo de elasticidade dinâmico de 35,94 GPa, em que todos os teores apresentaram aumento do módulo de elasticidade assim como o visto no tópico anterior relacionado ao ultrassom, desta vez com aumentos na ordem de 5,39%, 4,87% e 8,13% para as incorporações de 5%, 10% e 15% respectivamente.

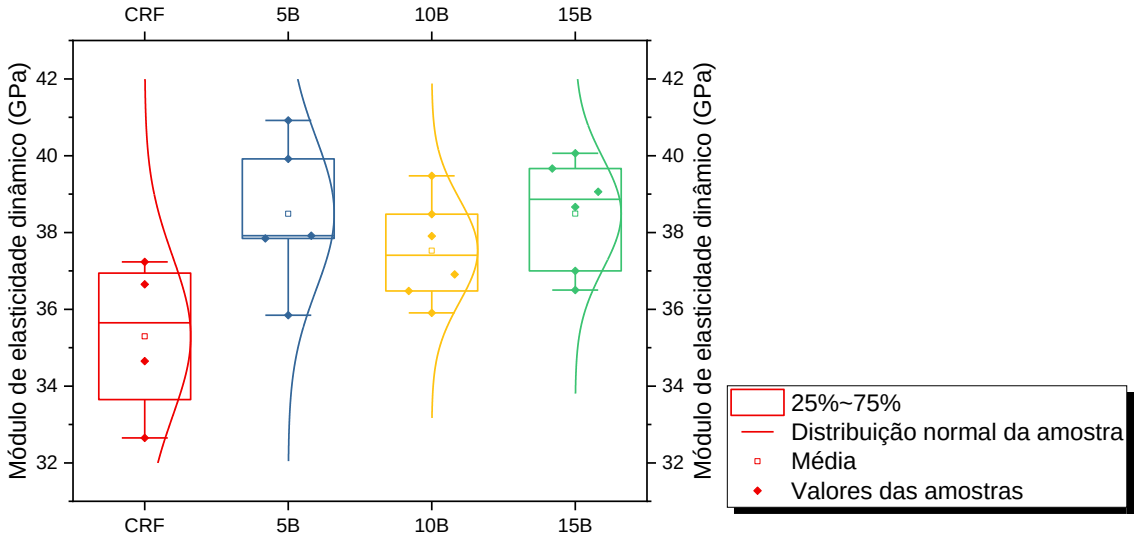
A figura 4.53 demonstra os valores obtidos juntamente com o desvio padrão e distribuição normal das amostras, e a Tabela 4.30 os valores médios amostrais.

Tabela 4.30 – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)* por teor substituição de agregado graúdo

Módulo de elasticidade com Sonelastic		
Traço	Módulo dinâmico (GPa)	Variação em relação a referência
REF	35,94	-
5B	37,88	5,39%
10B	37,69	4,87%
15B	38,86	8,13%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.53 – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)* por teor de substituição de agregado graúdo

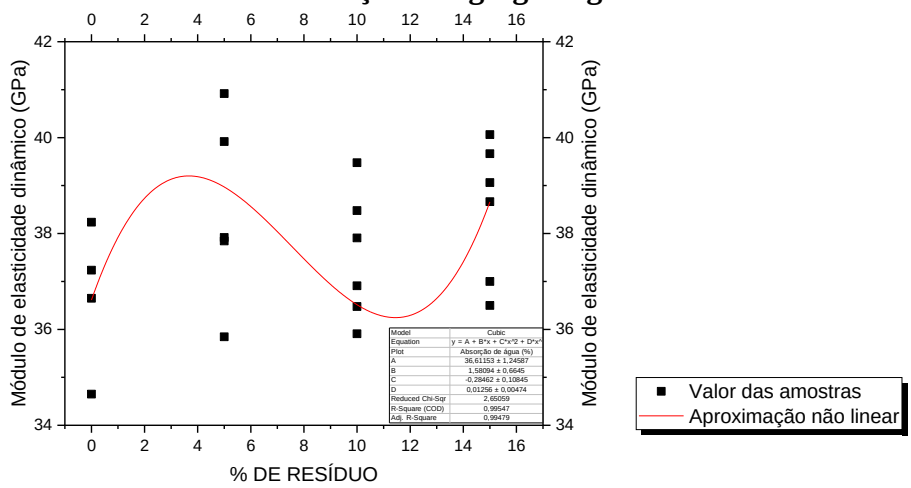


Fonte: Autor (2023)

De acordo com análise estatística ANOVA, todas as incorporações aumentaram o módulo de elasticidade dinâmico do concreto com confiabilidade de 95%, assim como o visto no ensaio anterior utilizando de ultrassom.

A aproximação linear realizada está representada na Figura 4.54 abaixo, possuindo fator R^2 de 0,99457.

Figura 4.54 – Módulo de elasticidade dinâmico (Sonelastic) por teor de substituição de agregado graúdo



Fonte: Autor (2023)

A curva obtida se mostrou com formato semelhante a obtida no ensaio anterior utilizando-se da medição da velocidade de ondas de ultrassom pelo concreto, com tendência ao

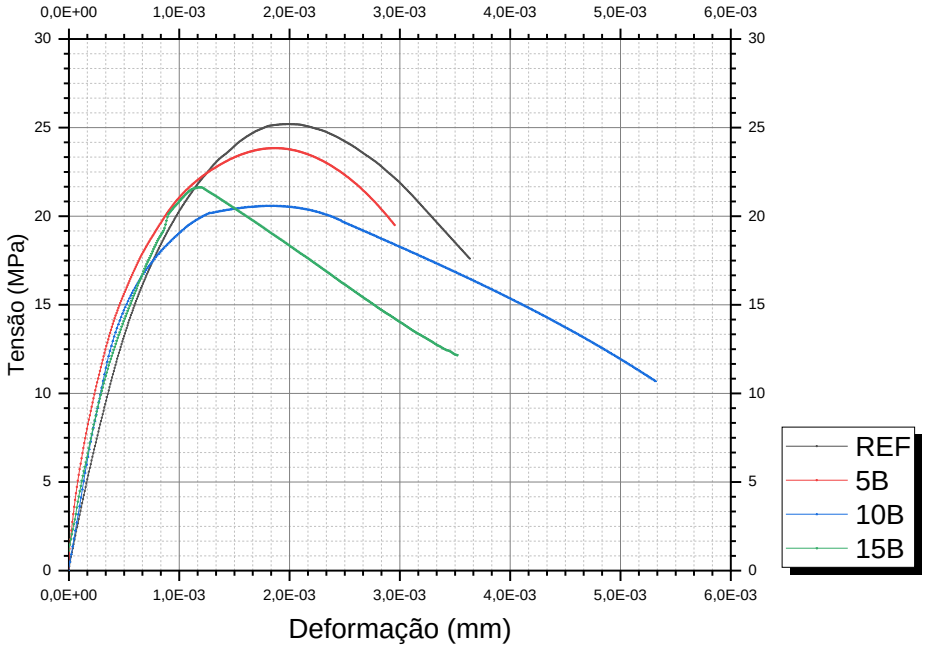
aumento em teores superiores a 15%, e vértices nos teores de 2% e 12% novamente.

Assim como para o agregado miúdo, os módulos obtidos serão comparados e discutidos em tópico apropriado.

4.4.2.6 Módulo de elasticidade estático – NBR 8522-1

Assim como para as incorporações de agregado miúdo, foi confeccionada a curva média dos dados coletados, representada na Figura 4.55.

Figura 4.55 – Curvas tensão por deformação para as substituições de agregados graúdos



Fonte: Autor (2023)

O efeito de tenacidade anteriormente notado nas substituições de agregados miúdos não se manifestou neste caso. Portanto, não é possível afirmar que a limalha de aço atua como um material fibroso no concreto sob estas condições ou teores de incorporação.

O módulo de elasticidade estático para cada corpo de prova de cada traço, bem como para as curvas médias está contido na Tabela 4.31 abaixo:

Tabela 4.31 – Módulo de elasticidade estático para substituições de agregado graúdo

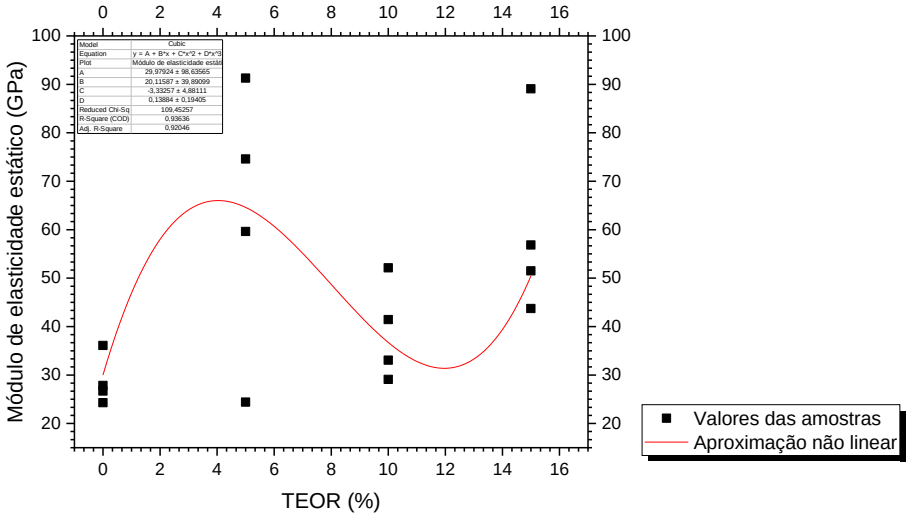
	REF	5B	10B	15B
CP1	-	-	29,11	35,63
CP2	24,30	-	48,56	35,66
CP3	36,09	40,60	-	-
CP4	27,85	24,40	33,08	-
CP5	26,69	30,52	41,45	35,66
CP6	-	-	19,76	43,72
Média	**28,73**	**31,84**	**34,39**	**37,67**
Variação	0	11%	20%	31%
Módulo da curva média	**29,35**	31,65	34,78	32,56

Fonte: Autor (2023)

Ao contrário do observado para a substituição de agregado miúdo, todas as incorporações de limalha de aço ocasionaram significativos aumentos no módulo de elasticidade estático do concreto, sendo superiores em até 31% frente ao concreto de referência, estes aumentos continuam expressivos mesmo se descartamos os valores distantes até 20% da média.

A análise de variância das médias obteve grau de confiabilidade de 95%, 85% e 90% para as incorporações de 15%, 10% e 5%, respectivamente. A aproximação não linear que relaciona o módulo pelo teor de incorporação pode ser observada na Figura 4.56, possuindo fator R^2 de 0,93636, com curva semelhante a obtida no módulo de elasticidade dinâmico, com tendência ao aumento em teores superiores ao estudado.

Figura 4.56 – Módulo de elasticidade estático por teor de substituição de agregado graúdo



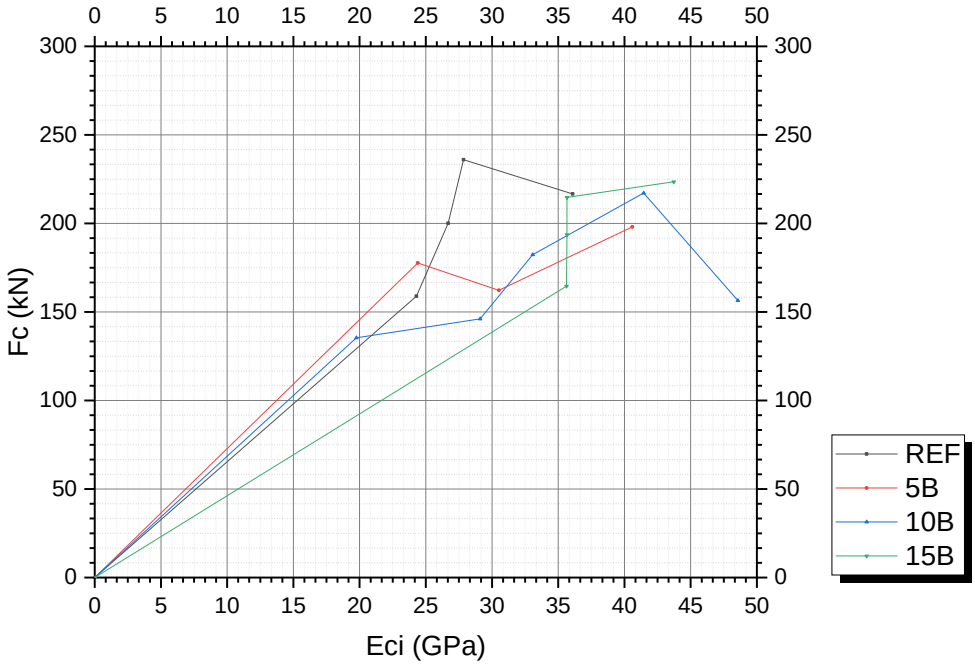
Fonte: Autor (2023)

4.4.2.7 Correlações entre as resistências obtidas e os módulos de elasticidade

As correlações apresentadas para os agregados miúdos também foram feitas para os traços com substituição de agregados graúdos, com o objetivo de relacionar as propriedades vistas até então, todas as curvas a serem apresentadas possuem fator R^2 superior a 0,97.

Iniciando pela comparação entre o valor do módulo estático obtido pela curva de tensão por deformação com a carga de ruptura à compressão, conforme Figura 4.57.

Figura 4.57 – Carga de ruptura à compressão X Módulo estático

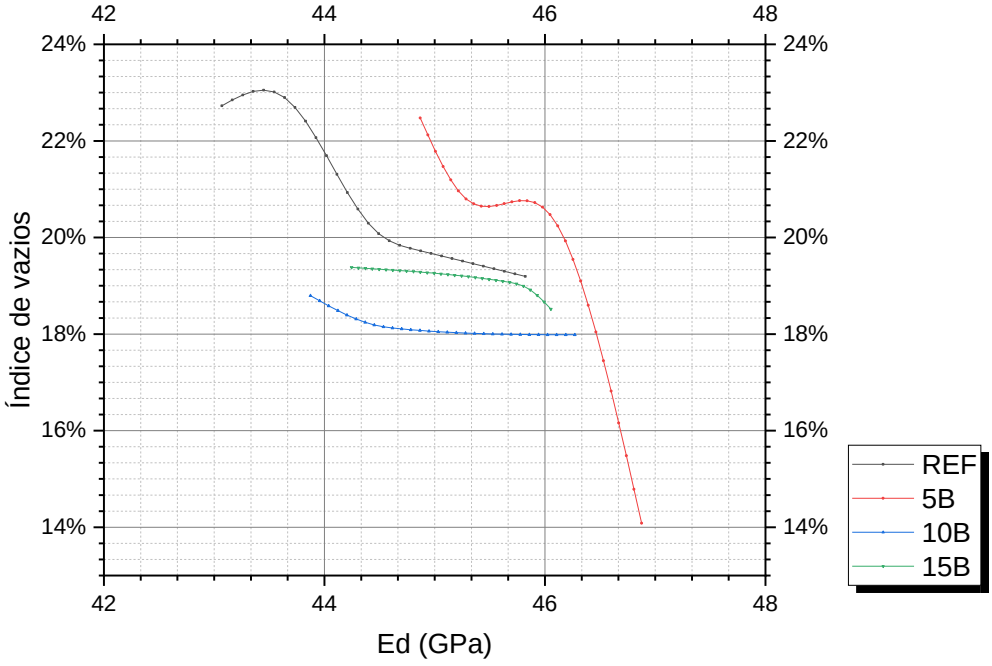


Fonte: Autor (2023)

Em relação ao traço de referência, no geral as incorporações de limalha de aço apresentaram cargas de ruptura menores, porém com o mesmo valor de módulo estático, ou seja, possuem uma menor sucessibilidade a deformações permanentes se comparado ao concreto convencional, vale notar também que, ao contrário do visto nas substituições de agregados miúdos, as retas possuíram pouca variabilidade, se comportando semelhante ao concreto de referência.

O índice de vazios do concreto foi relacionada com o módulo de elasticidade dinâmico conforme Figura 4.58:

Figura 4.58 – Índice de vazios X Módulo dinâmico (Ultrassom)



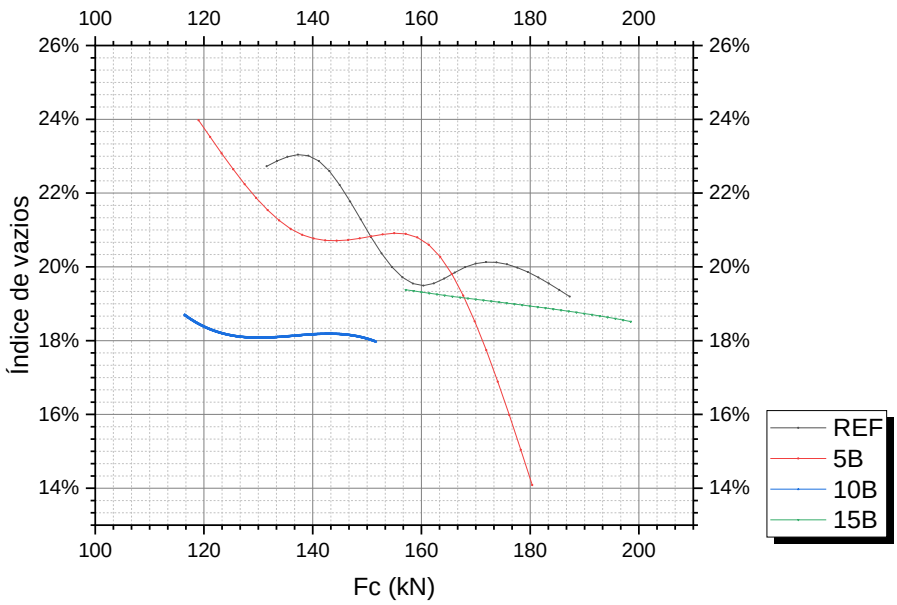
Fonte: Autor (2023)

No geral é visto principalmente para os traços “REF” e “5B” maiores variabilidades dos índices de vazios no concreto com o módulo de elasticidade, porém existe o comportamento decrescente da curva, implicando em módulos maiores para índices de vazios menores.

Os traços “10B” e “15B” apresentaram índices de vazios semelhantes para variações nos valores dos módulos, ainda que com curvas decrescentes, ou seja, o acréscimo do módulo de elasticidade nestes casos recebe uma maior influência da composição dos agregados utilizados do que do índice de vazios do concreto.

A relação entre índice de vazios e resistência à compressão também foi realizada, com a resistência de “10B” e “15B” sendo influenciadas por esta propriedade, porém não de maneira expressiva, oposto ao observado para o traço “REF” e “5B”, em que, mesmo os concretos com 5% de limalha de aço serem consideravelmente menos porosos, a limalha atuou de maneira negativa para a resistência do concreto, ou seja, a diminuição da resistência pode estar atrelada a piora na qualidade dos agregados utilizados. As curvas estão demonstradas na Figura 4.59 abaixo.

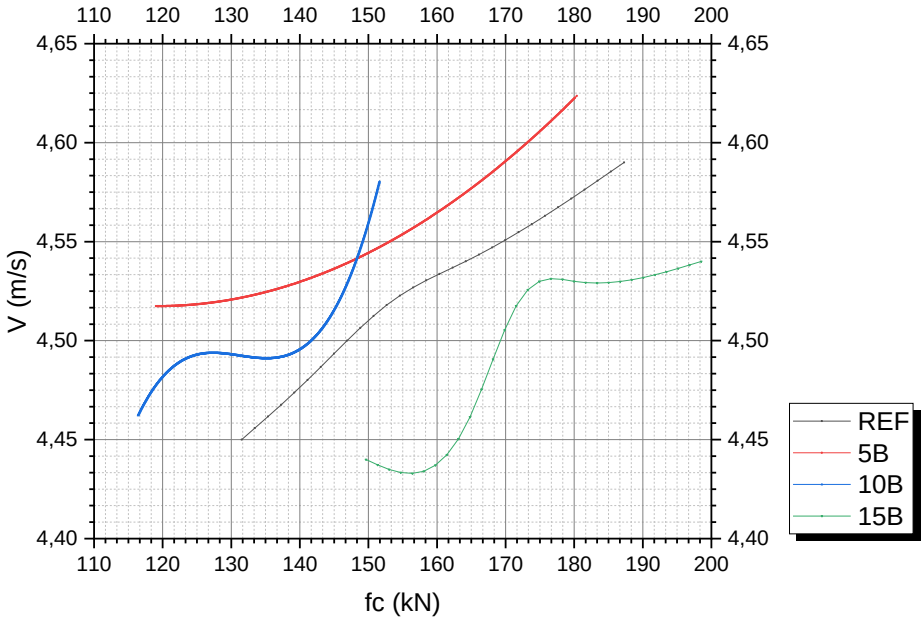
Figura 4.59 – Índice de vazios X Carga de ruptura à compressão



Fonte: Autor (2023)

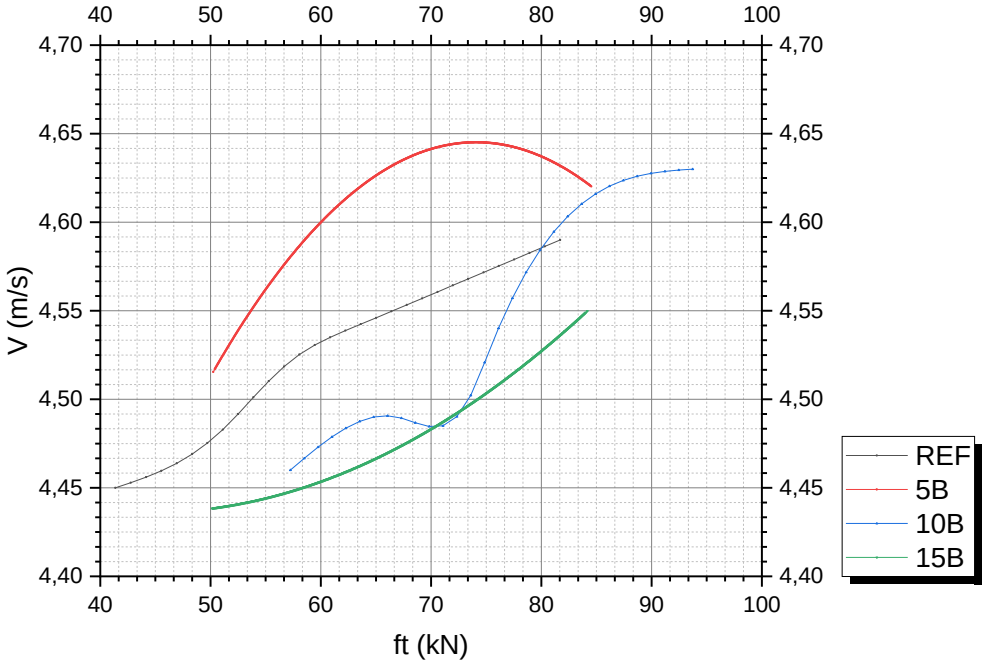
Como visto anteriormente outro parâmetro que mede a qualidade do concreto é a velocidade de propagação das ondas de ultrassom, conforme a Figura 4.16, sendo realizada as correlações desta velocidade com as cargas de ruptura de compressão e tração dos corpos de prova, conforme Figura 4.60 e 4.61.

Figura 4.60 –Velocidade de propagação de ondas de ultrassom X Carga de ruptura à compressão



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.61 –Velocidade de propagação de ondas de ultrassom X Carga de ruptura à tração



Fonte: Autor (2023)

Mesmo os teores de 5% e 10% tendo no geral reduzido as resistências à compressão do concreto, ocasionaram uma melhora no concreto produzido.

Conforme estas correlações realizadas é possível concluir que, as variações nas propriedades mecânicas do concreto está atrelada principalmente com a qualidade dos agregados utilizados, e não apenas do concreto produzido, ou seja, a maior influência nos valores é decorrente da geometria e composição dos agregados.

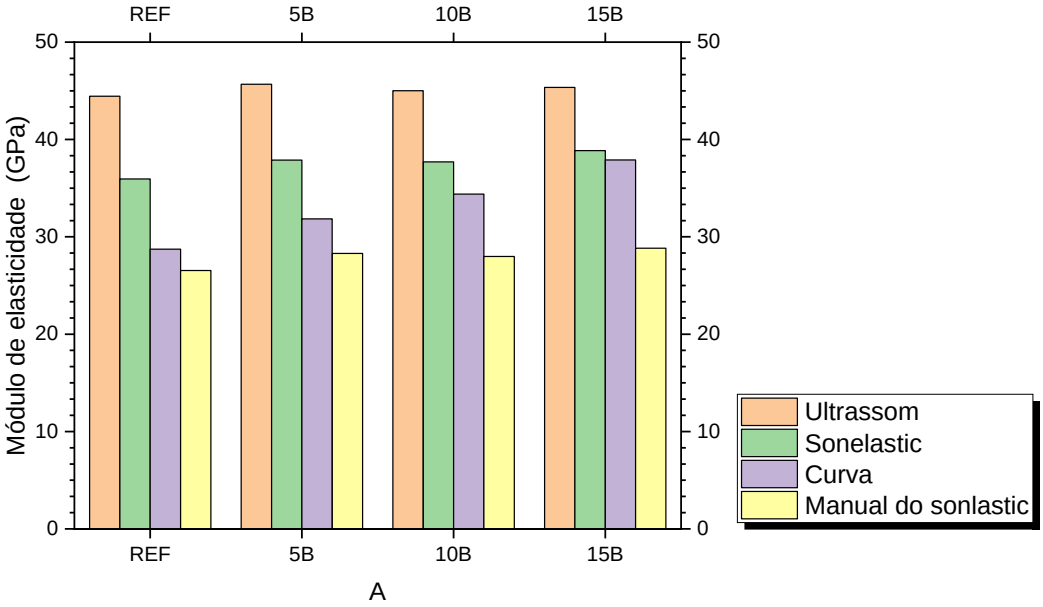
Por fim foram comparados os módulos de elasticidade dinâmico e estático por diferentes metodologias, conforme gráfico da Figura 4.62, utilizando os valores médios apresentados na Tabela 4.32.

Tabela 4.32 –Módulos de elasticidade obtidos para as substituições de agregados graúdos

Traço	Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)	Módulo de elasticidade dinâmico (Sonelastic)	Módulo de elasticidade (Curva)	Módulo de elasticidade estático (Manual)
REF	44,44	35,94	38,73	26,55
5B	45,67	37,88	31,84	28,30
10B	45,00	37,69	34,39	27,98
15B	45,35	38,86	37,67	28,83

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.62 –Módulos de elasticidade obtidos para as substituições de agregados miúdos



Fonte: Autor (2023)

O método do ultrassom, assim como para as substituições de agregado miúdo, apresentou os maiores valores, com as variações obtidas dos traços com incorporações para a referência semelhante ao visto no *Sonelastic*, com os dois métodos possuindo concordância neste ponto.

Para o módulo estático por ambos os métodos é possível observar a tendência do aumento dos módulos com o acréscimo de resíduos, com valores menores obtidos através dos cálculos.

4.4.2.8 Análise dos corpos de prova após imersão em solução agressiva

.

As variações das massas para as substituições de agregado graúdo foram mais expressivas se comparado as de agregados miúdos, porém, não foram verificadas alterações significativas deste parâmetro nas amostragens, com análise de variância de média não obtendo grau de confiabilidade suficiente para diferenciar as amostras “atacadas” para as de “referência”.

Tabela 4.33 – Variações das massas dos corpos de prova (substituição de agregado graúdo) – Antes e após imersão

	Variações das massas dos corpos de prova			
	REF	5B	10B	15B
Solução de 5% de sulfato de sódio	4,71%	3,87%	1,45%	0,41%
de sódio	4,06%	5,28%	2,43%	0,30%
CP - Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio	6,41%	3,69%	2,39%	2,78%

Fonte: Autor (2023)

Assim como observado nas substituições de agregado miúdo não foram registradas alterações significativas nas dimensões dos corpos de prova, tendo valor máximo de aumento de 0,84 mm de diâmetro no traço “5B” na solução de 10% de sulfato de sódio, e diminuição máxima de 0,57 mm na altura do traço “10B” também na mesma solução.

Os resultados das propriedades mecânicas serão apresentados de maneira semelhante ao visto na análise dos agregados miúdos.

4.4.2.8.1 Solução de 5% de sulfato de sódio – Propriedades mecânicas

Os valores médios obtidos das propriedades mecânicas analisadas para os traços atacados estão contidos na Tabela 4.34. também é possível observar na mesma a variação destes valores em relação aos traços de referência.

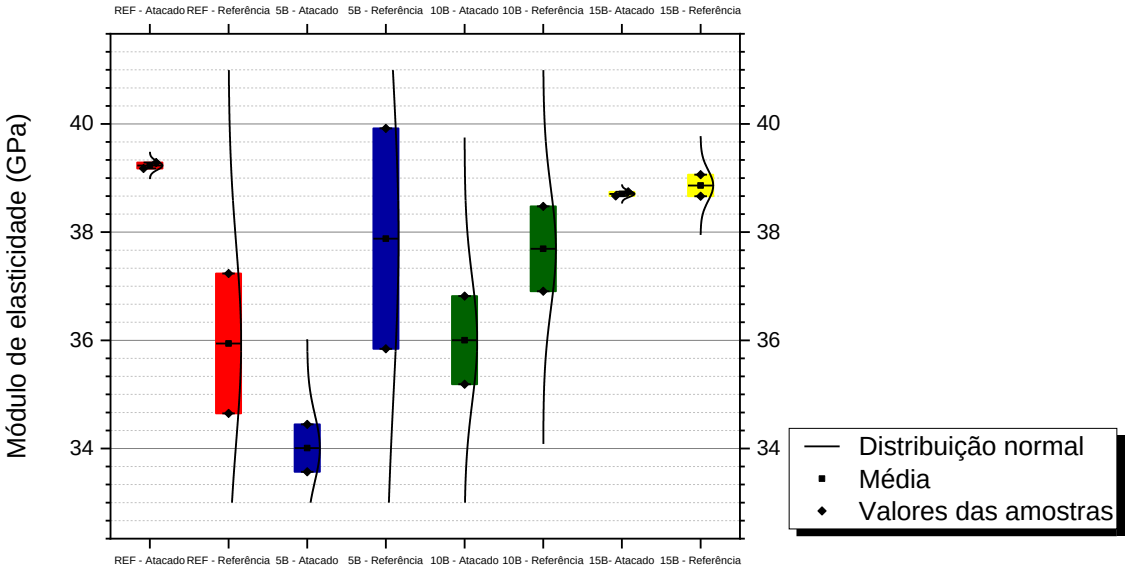
Tabela 4.34 – Propriedades mecânicas (substituição de agregado graúdo) – Solução de 5% de sulfato de sódio

	CP - Solução de 5% de sulfato de sódio			
	REF	5B	10B	15B
Resistência à compressão (180 Dias)	26,42	16,63	22,42	29,60
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	46,82	40,95	41,80	42,74
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	39,23	34,01	36,00	38,71
	CP - Referência			
	REF	5B	10B	15B
Resistência à compressão (180 Dias)	28,16	23,81	27,53	28,27
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	43,19	44,11	43,63	43,82
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	35,94	37,88	37,69	38,86
	Variações entre "Atacados" com "Referência"			
	REF	5B	10B	15B
Resistência à compressão (180 Dias)	-6,17%	-30,16%	-18,56%	4,70%
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom	8,41%	-7,16%	-4,19%	-2,46%
Módulo de elasticidade dinâmico - Sonelastic	9,15%	-10,22%	-4,48%	-0,39%

Fonte: Autor (2023)

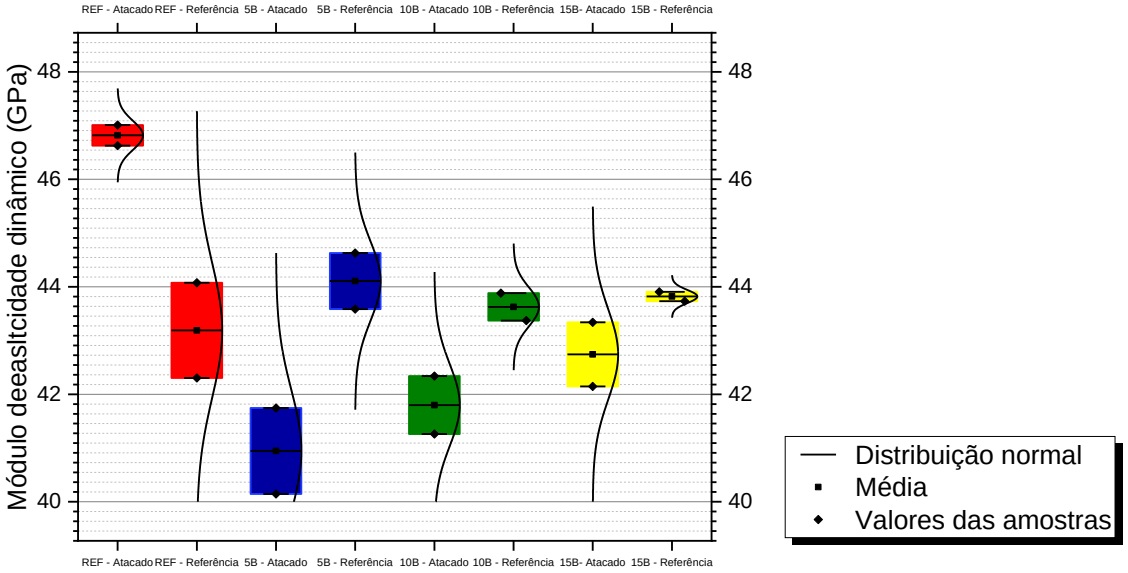
Os valores obtidos do módulo de elasticidade dinâmico através do ensaio de ultrassom e do *Sonelastic* podem ser observados no gráfico representado na Figura 4.63 e 4.64.

Figura 4.63 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.64 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)



Fonte: Autor (2023)

As variações obtidas do módulo de elasticidade dinâmico nas duas metodologias se mostram semelhantes, a diminuição deste parâmetro indica a agressividade da solução no concreto, desta forma é possível notar que, conforme se aumentam as limalhas de aço no concreto menor é o decréscimo no valor do módulo, ou seja, teores mais elevados deste resíduo

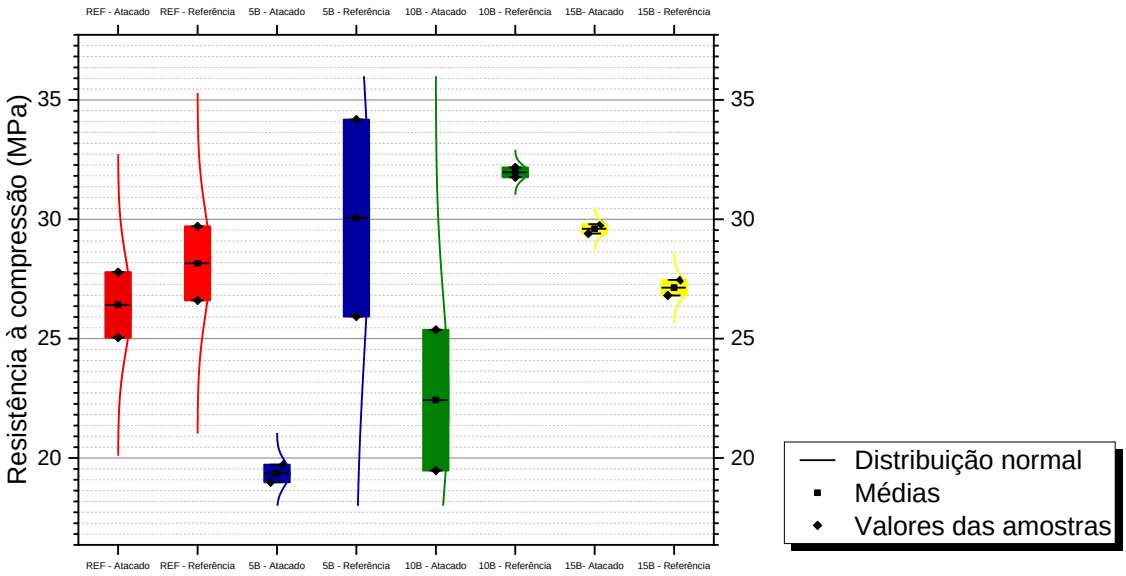
tendem a retardar o efeito da solução e talvez até mesmo evitar que ocorra essa diminuição na propriedade.

A resistência à compressão do concreto foi diminuída nos traços “REF”, “5B” e “10B”, com o traço de referência obtendo o menor decréscimo, comparativamente as reduções vistas nos teores de 5% e 10% se mostraram semelhantes, indicando que, para teores até 10% a degradação do concreto para a resistência à compressão tende a ser a mesma.

O traço “15B” de acordo com análise de variância de média, não sofreu alterações em suas resistências frente a solução de 5% de sulfato de sódio, para teores então de 15% não há efeito de agressividade no concreto.

Os valores amostrais obtidos para a resistência à compressão estão contidos na Figura 4.65 abaixo:

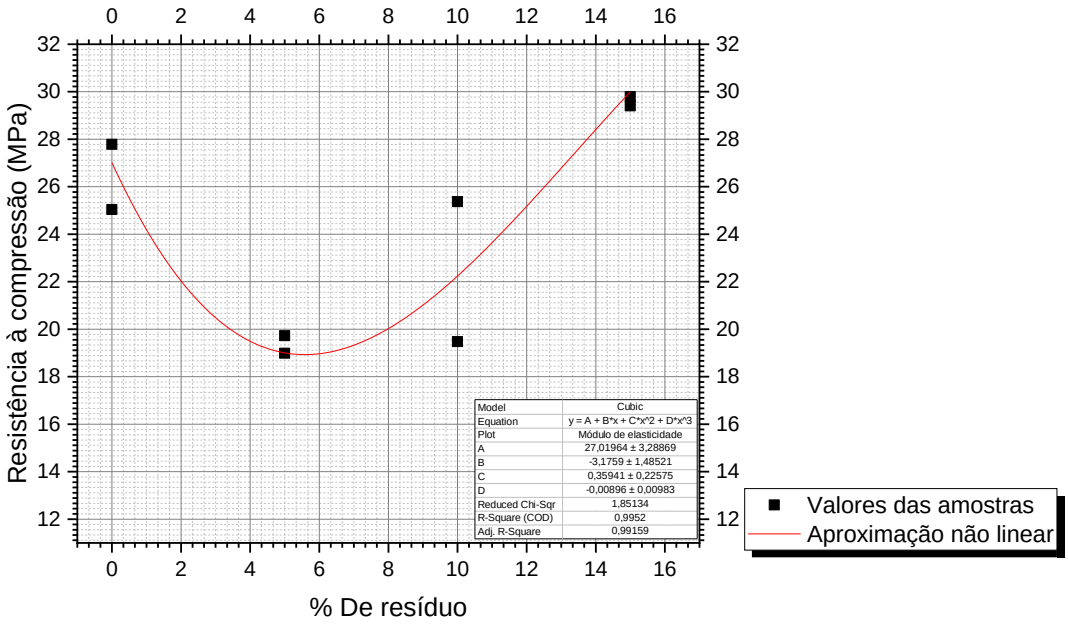
Figura 4.65 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Resistência à compressão



Fonte: Autor (2023)

Foi realizada a aproximação não linear da resistência à compressão do concreto por teor de incorporação utilizando os dados obtidos dos corpos de prova atacados, comparando com a Figura 4.46 anteriormente, o fator R^2 obtido foi de 0,9952, com a curva representada na Figura 4.66:

Figura 4.66 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de agregado graúdo) – Solução de 5% de sulfato de sódio



Fonte: Autor (2023)

É possível observar que, assim como para 28 dias, existe à redução da resistência à compressão do concreto, porém, ainda há a tendência do crescimento em teores superiores a 15%, assim como visto aos 28 dias.

Em resumo, o comportamento mecânico de cada traço de concreto imerso na solução de 5% de sulfato de sódio foi:

- REF (0%): Aumento no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco ou nenhum efeito da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão;
- 5B (5%): Maior diminuição no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, sendo este o traço com maior efeito da solução neste parâmetro; diminuição expressiva da resistência à compressão, efeito semelhante a 10B;
- 10B (10%): Diminuição no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, diminuição expressiva da resistência à compressão, efeito semelhante ao traço 5B;
- 15B (15%): Pouca variação no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco efeito da solução neste parâmetro; pouco ou nenhum efeito da solução na resistência à compressão do concreto.

4.4.2.8.2 Solução de 10% de sulfato de sódio – Propriedades mecânicas

Os valores médios para os módulos de elasticidades dinâmicos e resistência à compressão estão representados na Tabela 4.35, bem como as variações obtidas para cada.

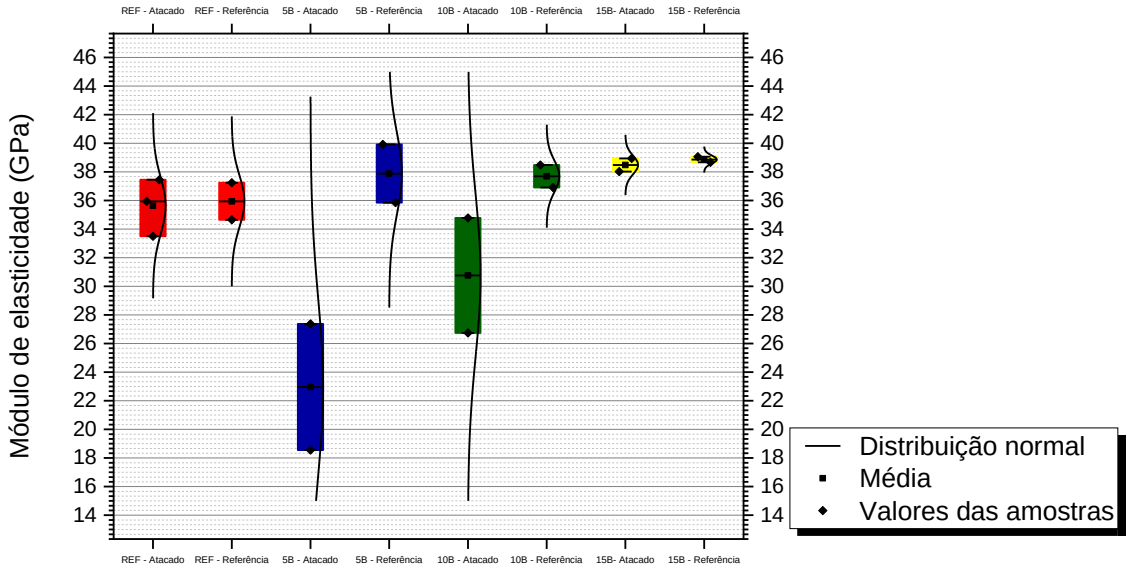
Tabela 4.35 – Propriedades mecânicas (substituição de agregado graúdo) – Solução de 10% de sulfato de sódio

	CP - Solução de 10% de sulfato de sódio			
	REF	5B	10B	15B
Resistência à compressão (180 Dias)	14,27	13,12	14,95	24,38
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	43,10	26,48	36,74	41,74
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	35,48	22,96	30,76	38,48
	CP - Referência			
	REF	5B	10B	15B
Resistência à compressão (180 Dias)	28,16	23,81	27,53	28,27
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	43,19	44,11	43,63	43,82
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	35,94	37,88	37,69	38,86
	Variações entre "Atacados" com "Referência"			
	REF	5B	10B	15B
Resistência à compressão (180 Dias)	-49,31%	-44,91%	-45,68%	-13,75%
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom	-0,22%	-39,96%	-15,79%	-4,75%
Módulo de elasticidade dinâmico - Sonelastic	-1,30%	-39,39%	-18,40%	-0,99%

Fonte: Autor (2023)

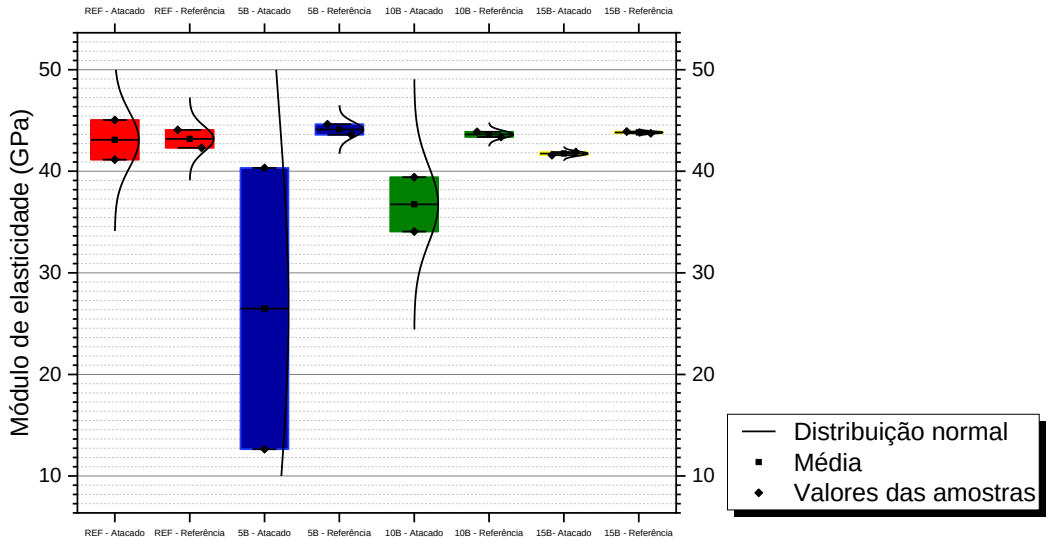
Os valores amostrais obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico através do ensaio de ultrassom e do *Sonelastic* estão representados pelo gráfico da Figura 4.67 e 4.68.

Figura 4.67 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.68 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)



Fonte: Autor (2023)

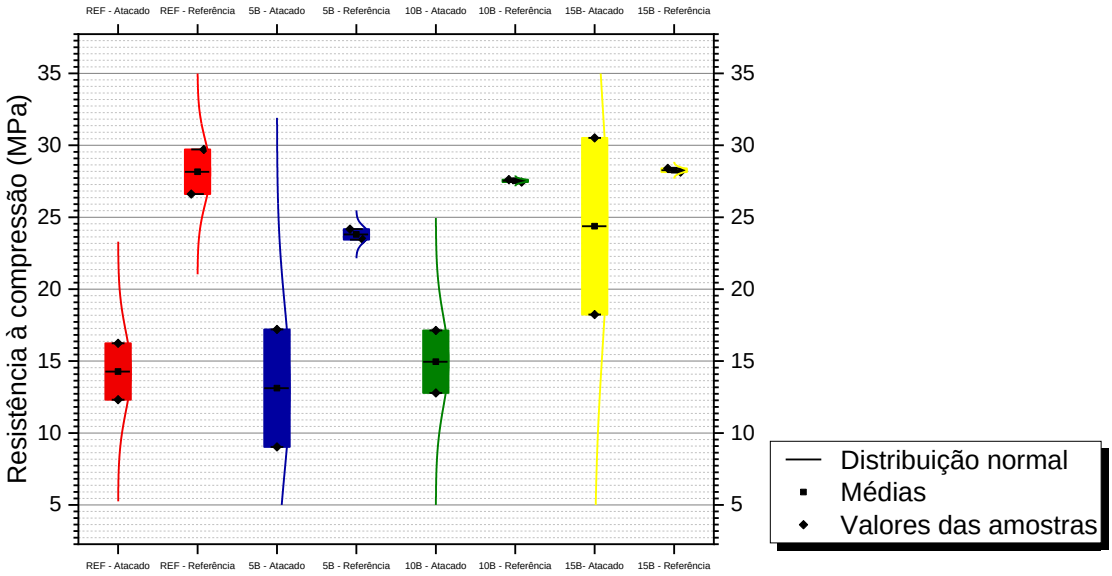
As variações encontradas no ensaio com ultrassom e *Sonelastic* se mostraram bem próximas, demonstrando concordância dos valores obtidos nos dois métodos, com reduções em todas as incorporações de limalha de aço, assim como visto na solução anterior, o aumento da porcentagem de limalha de aço tende a atenuar o efeito do decréscimo do módulo de elasticidade dinâmico do concreto.

Para traço de referência, foi constatado não variação do módulo dinâmico do concreto nesta solução conforme análise de variância de média, implicando atuação da solução superior ao visto na solução de 5% de sulfato de sódio, mas ainda pouco expressiva.

A resistência a compressão do concreto foi diminuída para todos os traços, porém a maior diminuição está presente no concreto de referência, ou seja, este foi o que mais sofreu diminuição da resistência para esta solução. Assim como para o módulo de elasticidade dinâmico, quanto maior a porcentagem de resíduo menor tende a ser o efeito desta solução, com a limalha de aço amenizando do efeito na redução da resistência à compressão do concreto.

Os valores amostrais estão contidos na Figura 4.69 abaixo:

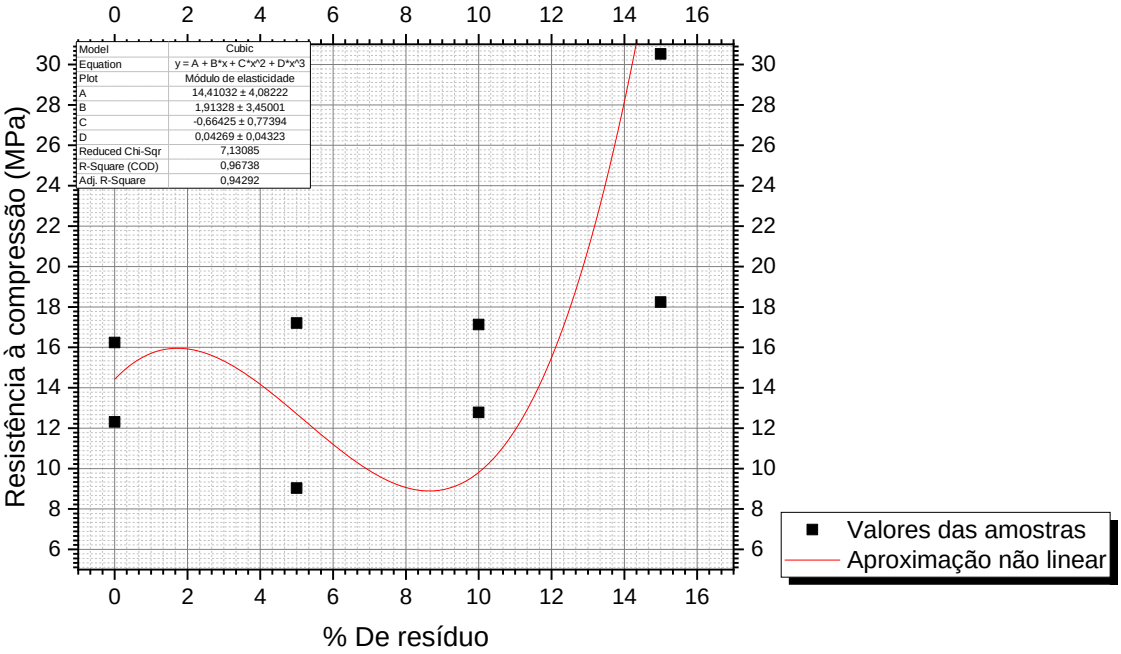
Figura 4.69 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Resistência a compressão



Fonte: Autor (2023)

A aproximação não linear, entre os traços atacados, obteve fator R^2 de 0,9952, representada de acordo com a Figura 4.70 abaixo.

Figura 4.70 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de agregado graúdo) – Solução de 10% de sulfato de sódio.



Fonte: Autor (2023)

Novamente foi observado as reduções na resistência à compressão do concreto até certa incorporação, com a tendência de acréscimos deste parâmetro para teores superiores a 15%.

Em resumo, o comportamento mecânico de cada traço de concreto imerso na solução de 10% de sulfato de sódio foi:

- REF (0%): Pouca variação no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco efeito da solução neste parâmetro; maior diminuição da resistência à compressão;
- 5B (5%): Diminuição no módulo de elasticidade com a idade com valor semelhante ao “10B”, efeito expressivo da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão;
- 10B (10%): Diminuição no módulo de elasticidade com a idade com valor semelhante ao “5B”, efeito expressivo da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão;
- 15B (15%): Pequena redução no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco efeito da solução neste parâmetro; menor diminuição da resistência à compressão.

4.4.2.8.3 Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio – Propriedades mecânicas

Os valores médios obtidos das propriedades mecânicas dos traços atacados estão contidos na Tabela 4.36. também juntamente com a variação destes valores em relação aos traços de referência.

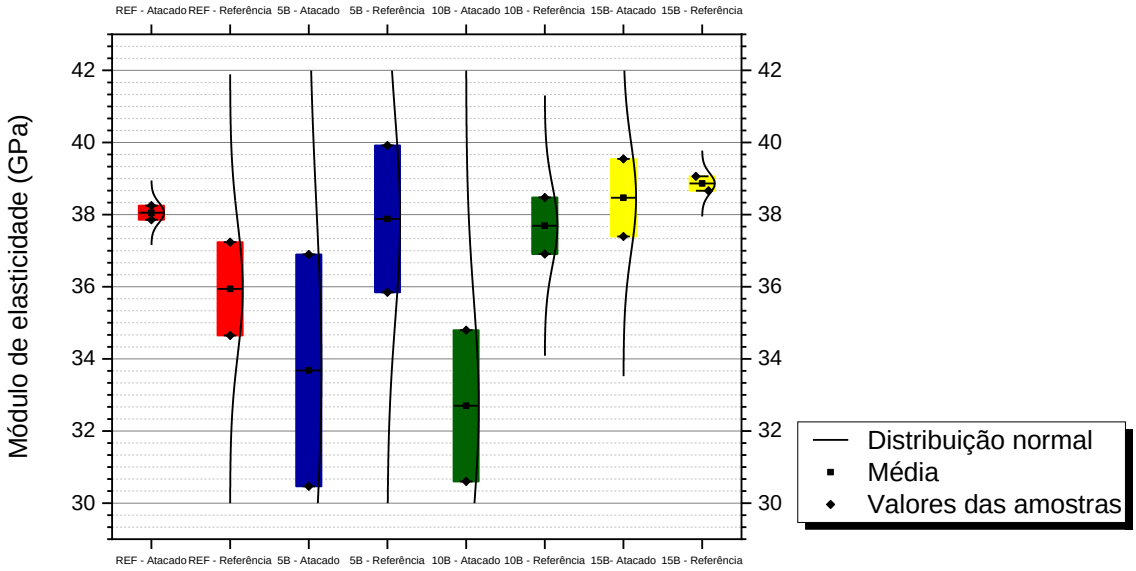
Tabela 4.36 – Propriedades mecânicas (substituição de agregado graúdo) – Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio

	CP - Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio			
	REF	5B	10B	15B
Resistência à compressão (180 Dias)	18,65	16,31	11,03	22,60
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	48,41	42,03	40,47	42,82
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	38,05	33,68	32,70	38,47
	CP - Referência			
	REF	5B	10B	15B
Resistência à compressão (180 Dias)	28,16	23,81	27,53	28,27
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	43,19	44,11	43,63	43,82
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	35,94	37,88	37,69	38,86
	Variações entre "Atacados" com "Referência"			
	REF	5B	10B	15B
Resistência à compressão (180 Dias)	-33,76%	-31,50%	-59,93%	-20,06%
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom	12,09%	-4,72%	-7,24%	-2,28%
Módulo de elasticidade dinâmico - Sonelastic	5,87%	-11,09%	-13,24%	-1,00%

Fonte: Autor (2023)

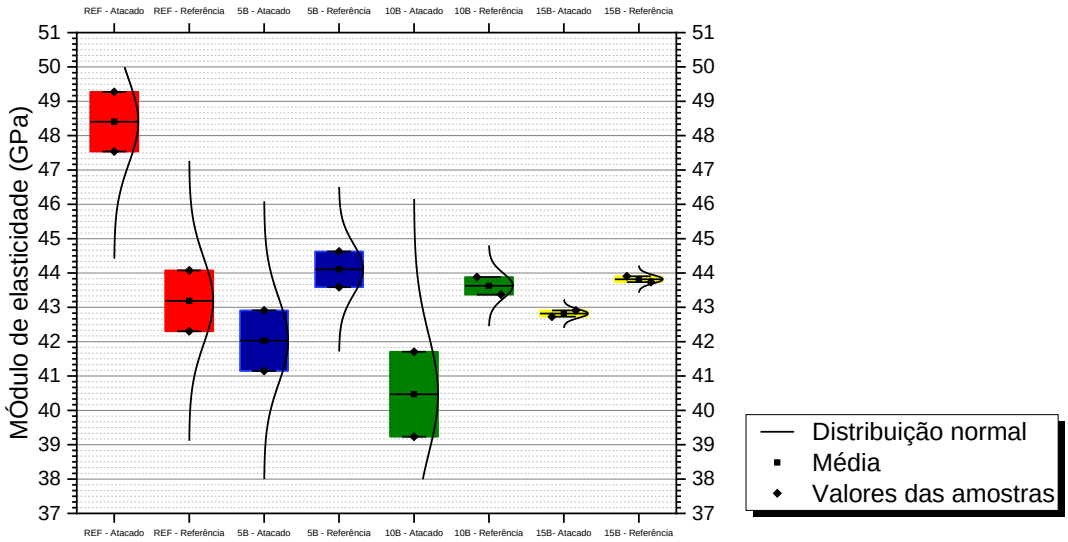
Os valores de cada amostra para o módulo de elasticidade dinâmico através do ensaio de ultrassom e do *Sonelastic* podem ser observados no gráfico representado na Figura 4.71 e 4.72.

Figura 4.71 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.72 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)



Fonte: Autor (2023)

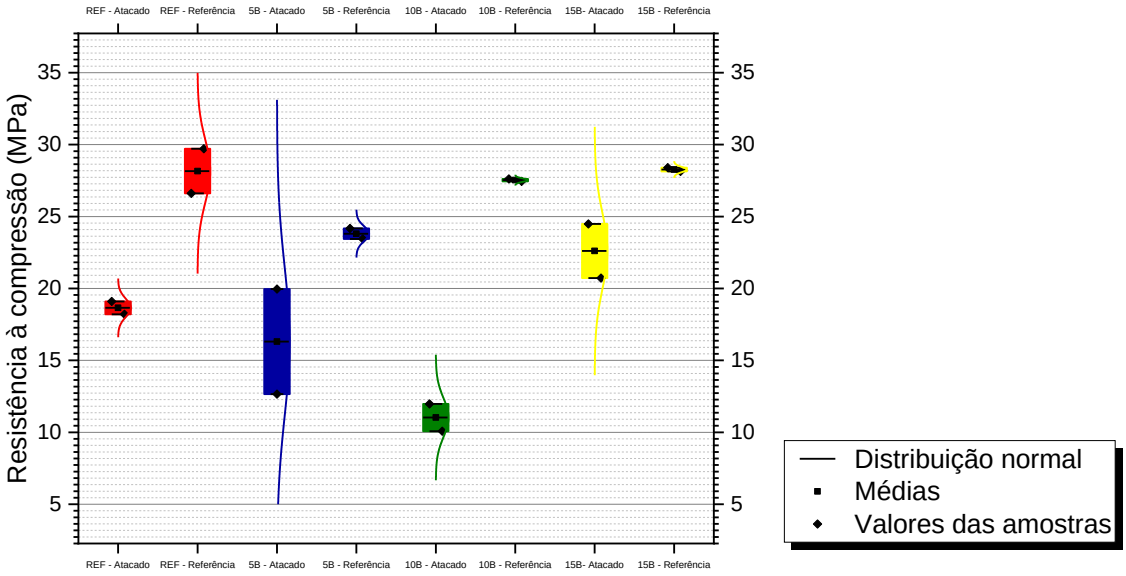
Novamente foi observada a concordância dos valores obtidos pelas duas metodologias, com variações semelhantes obtidas entre os traços de referência com os atacados.

O módulo de elasticidade dinâmico diminuiu em todas as incorporações, com valores próximos entre os traços “5B” e “10B”, assim como observado nas duas soluções anteriores o teor de 15% apresentou a menor redução, indicando novamente a tendência da redução do efeito desta solução com o aumento da quantidade de resíduo metálico.

A resistência a compressão do concreto sofreu reduções em todas as incorporações, com maior valor no traço com 10% de limalha de aço, porém o traço “T7” com 15% apresentou a menor redução deste parâmetro, até mesmo em relação ao traço de referência, indicando novamente a tendência da redução do efeito desta solução no concreto com o aumento de limalha de aço, ou seja, a inserção do resíduo a partir de certo ponto tende a não aumentar a degradação do concreto.

Os valores das amostras estão representados na Figura 4.73:

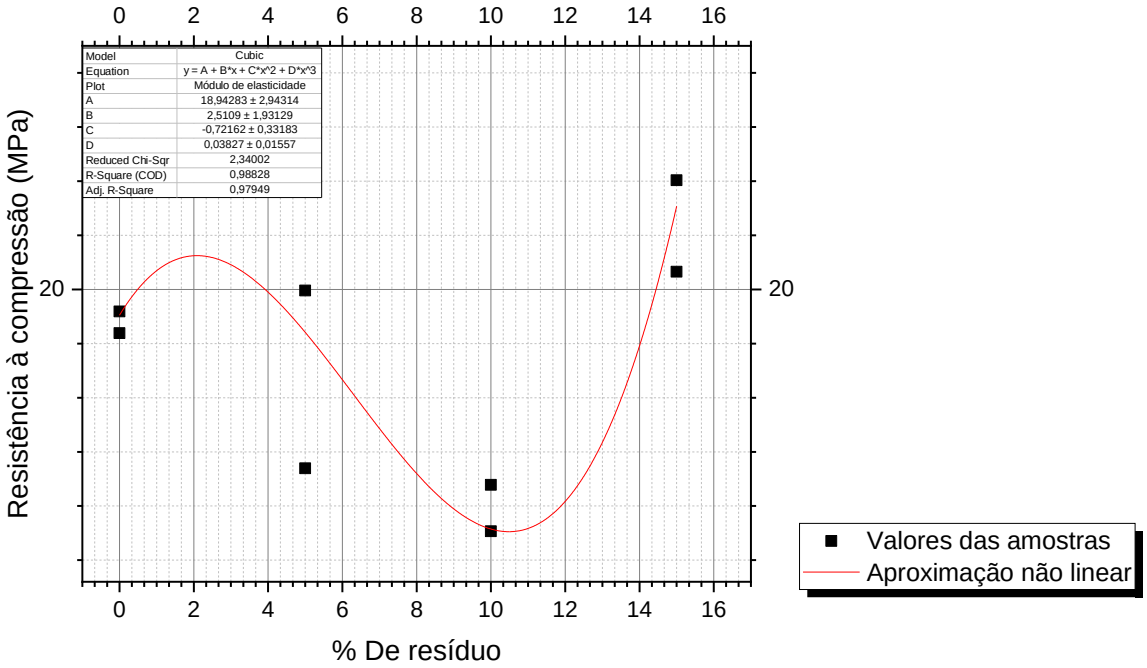
Figura 4.73 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de agregado graúdo) – Resistência a compressão



Fonte: Autor (2023)

A aproximação não linear foi realizada também para os traços atacados desta solução, obtendo fator R^2 de 0,98828, conforme Figura 4.74:

Figura 4.74 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de agregado graúdo) – Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio



Fonte: Autor (2023)

Assim como para os corpos de prova aos 28 dias, o formato da curva se deu semelhante, é possível observar que a limalha de aço continua apresentando acréscimo na resistência com 15% e com tendência ao aumento em proporções superiores a esta.

Em resumo o comportamento mecânico de cada traço para a solução de 5% de sulfato de sódio com 3% de sulfato de sódio foi:

- REF (0%): Aumento no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco ou nenhum efeito da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão;
- 5B (5%): Diminuição no módulo de elasticidade com a idade com valor semelhante ao “10B”, efeito expressivo da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão;
- 10B (10%): Diminuição no módulo de elasticidade com a idade com valor semelhante ao “5B”, efeito expressivo da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão;
- 15B (15%): Pequena redução no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco efeito da solução neste parâmetro; menor diminuição da

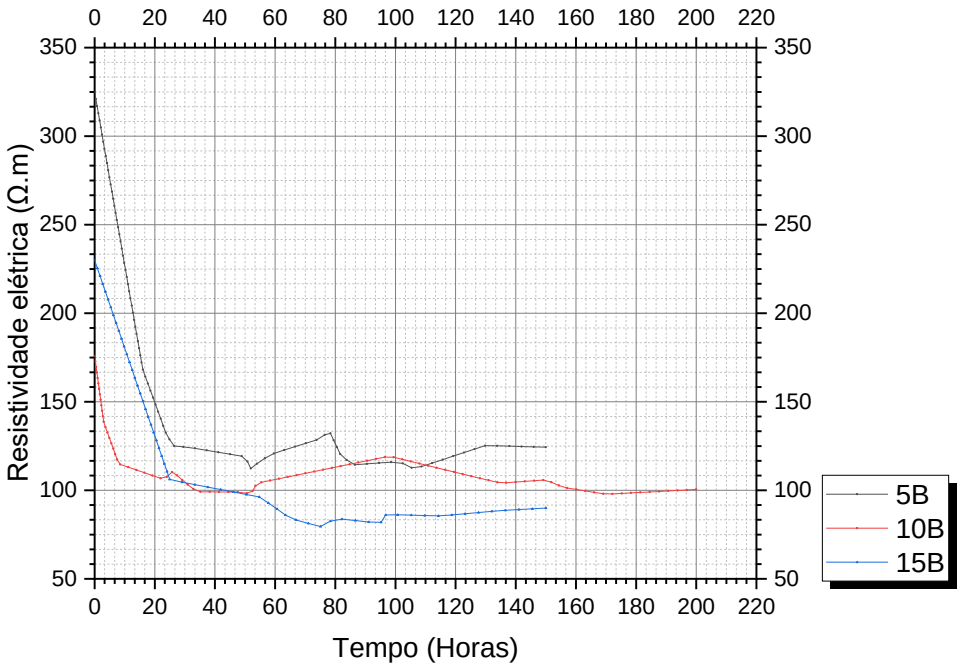
4.4.2.8.4 Considerações gerais a respeito dos resultados do ensaio de imersão

De maneira geral, foi observado comportamento semelhante dos 3 traços com limalha de aço nas três soluções estudas, com a degradação do concreto por imersão em solução agressiva superior nas incorporações até 10%, principalmente com relação ao módulo, com valores obtidos de decréscimos das propriedades mecânicas semelhantes entre os traços “5B” e “10B” indicando que a degradação ocorre de maneira semelhante independentemente da quantidade de limalha de aço nestes casos até pelo menos 10% de substituição de brita em relação ao peso do cimento. Porém o traço com 15% demonstrou redução no efeito da degradação do concreto nas três soluções, sendo então que, para este teor e talvez superiores a ele, é possível verificar a melhora na durabilidade do concreto frente a imersão em soluções agressivas.

4.4.2.9 Resistividade elétrica

Os valores de resistividade elétrica com o tempo para os traços com limalha de aço substituindo agregado graúdo estão representados abaixo na Figura 4.75.

Figura 4.75 – Resistividade elétrica por tempo – Substituições de agregados miúdos



Fonte: Autor (2023)

Todos os traços obtiveram resultados semelhantes, com tendência a se manter em valores próximos a 100 ohm.metro, este dentro do intervalo esperado para concretos convencionais.

De maneira geral é possível observar que, conforme se aumenta o teor de incorporação de limalha de aço reduz-se a resistividade elétrica do concreto, porém de maneira pouco expressiva. Estudos com porcentagens maiores podem apresentar reduções significativas.

4.4.3 Substituição de fibras de aço por limalha

4.4.3.1 Absorção de água, índice de vazios e massas específicas

O traço de referência do concreto reforçado com fibras agora não mais é o “REF” e sim o “CRF”, que obteve uma absorção de água de 7,21% enquanto as substituições de 25% e 50% apresentaram 7,17% e 8,43% respectivamente.

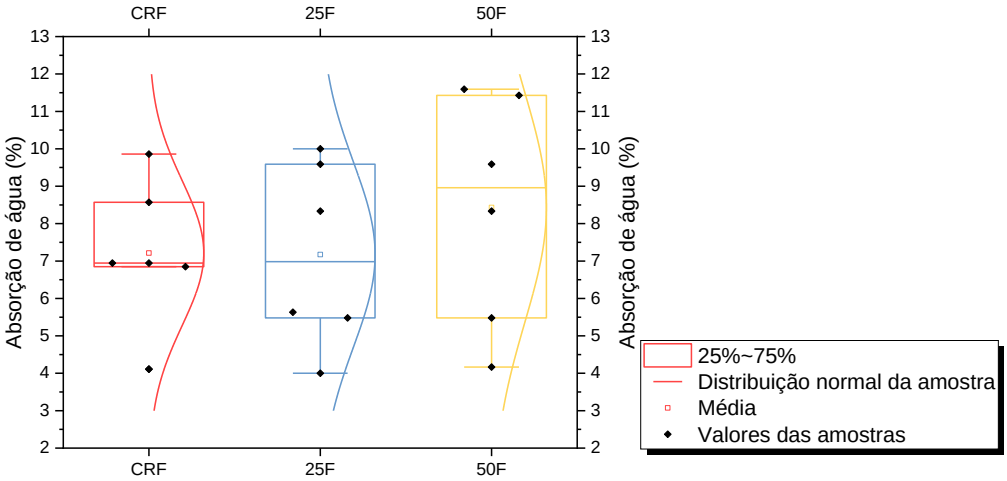
Os valores obtidos para cada amostra ensaiada estão contidos na Figura 4.76 e Tabela 4.37:

Tabela 4.37 – Absorção de água das substituições de fibras de aço

Absorção de água		
Traço	Absorção de água	Variação em relação a referência
CRF	7,21%	-
25F	7,17%	-0,56%
50F	8,43%	16,90%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.76 – Absorção de água das substituições de fibras de aço



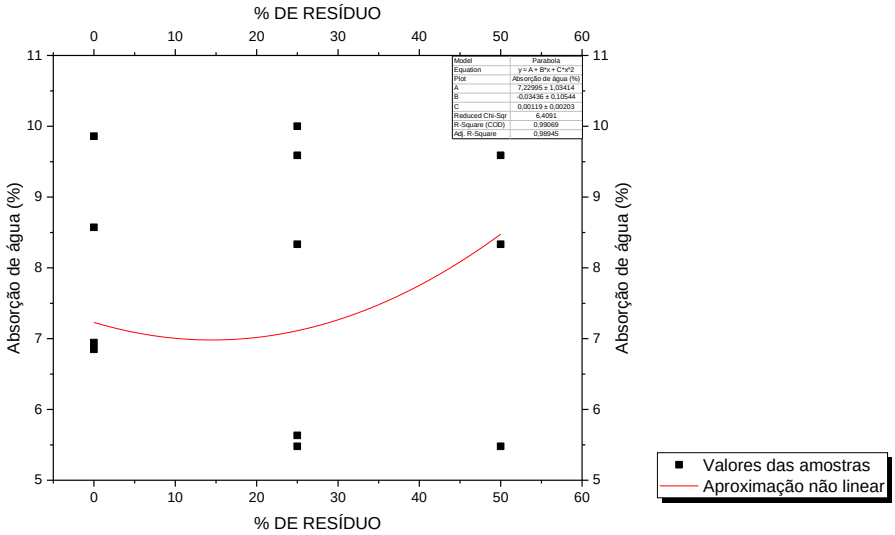
Fonte: Autor (2023)

É observado pelo gráfico acima que, a variabilidade dos valores obtidos em cada amostra é maior conforme o aumento da incorporação de limalha de aço, fator este que é atrelado com a geometria variável do resíduo, principalmente se comparado a fibras de aço comerciais das quais a forma é padronizada.

Estatisticamente pela análise de variância das médias não é possível diferenciar a amostra de referência com as de substituições “25F” e “50F”, é possível concluir que, se tratando deste parâmetro a substituição de fibras até 50% por limalhas de aço ocasiona uma alteração marginal e pouco representativa em seus valores.

A aproximação não linear realizada possui fator R^2 de 0,99069, sendo válida para as faixas de estudo apenas, presente na Figura 4.77, mesmo apresentando a tendência de crescimento ainda sim as variações são pouco relevantes.

Figura 4.77 – Absorção de água por teor de substituição de fibras de aço



Fonte: Autor (2023)

Com relação ao índice de vazios, os valores seguem o padrão visto na absorção de água, possuindo variações pouco significativas juntamente com uma variabilidade maior dos valores obtidos conforme o incremento do resíduo.

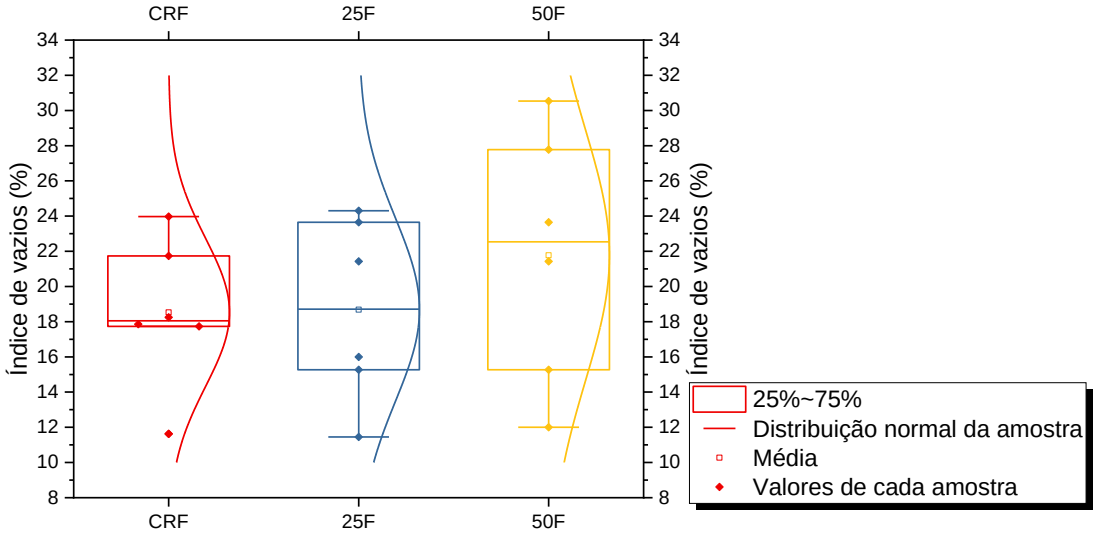
O traço de referência obteve um índice de vazios de 18,53%, variando para 18,68% e 21,75% para as substituições de 25% e 50%, os valores das amostras estão contidos na Figura 4.78 e Tabela 4.38:

Figura 4.38 – Índice de vazios das substituições de fibras de aço

Índice de vazios		
Traço	Índice de vazios	Variação em relação a referência
CRF	18,53%	-
25F	18,68%	0,83%
50F	21,78%	17,52%

Fonte: Autor (2023)

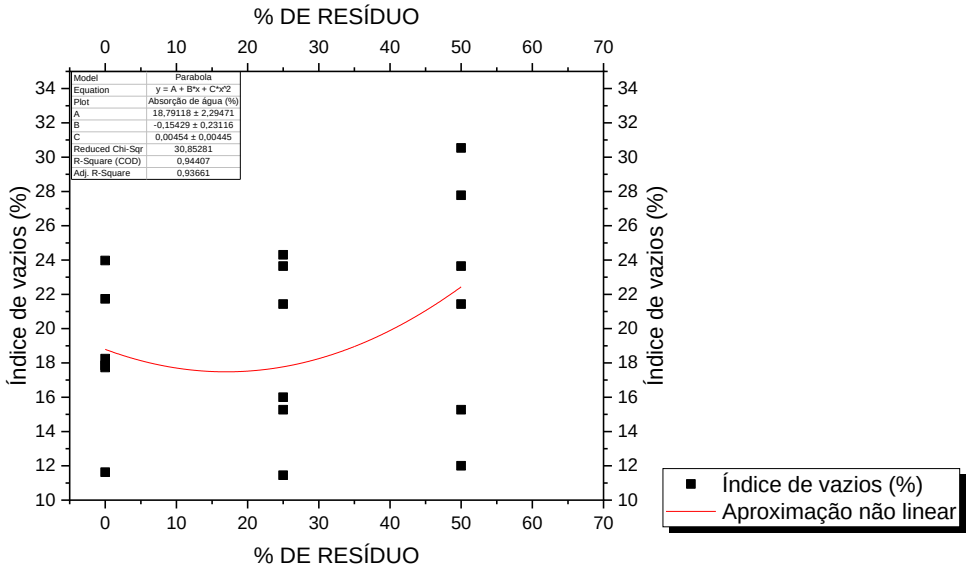
Figura 4.78 – Índice de vazios das substituições de fibras de aço



Fonte: Autor (2023)

A aproximação não linear realizada obteve fator R² de 0,94407, contida na Figura 4.79:

Figura 4.79 – Índice de vazios por teor de substituição de fibras de aço



Fonte: Autor (2023)

É possível afirmar que, com relação tanto a absorção de água como para o índice de vazios, a substituição de fibras de aço por resíduos de usinagem não proporciona alterações significativas no concreto, mesmo com a retirada de parte da fibra de aço, a limalha possui a capacidade de manter estes parâmetros com variações marginais, ou seja, a inserção do resíduo pouco alterou a capacidade de absorção de água do concreto e nem a quantidade dos vazios presentes na matriz do material.

Foram obtidas ao final deste ensaio as massas específicas seca, saturada e real, com valores contidos na Tabela 4.39 abaixo:

Tabela 4.39 – Massas específicas das substituições de fibras de aço

Traço	Massa específica seca média	Variação	Massa específica saturada média	Variação	Massa específica real média	Variação
CRF	2597,54	0,00%	2782,84	0,00%	3188,72	0,00%
25F	2659,51	2,39%	2846,34	2,28%	3269,30	2,53%
50F	2628,58	1,19%	2842,41	2,14%	3371,22	5,72%

Fonte: Autor (2023)

Todos os traços foram classificados conforme a NBR 8953 (ABNT, 2015) como “concretos convencionais”.

De acordo com a análise estatística das amostras não é possível afirmar que as substituições alteraram as massas específicas com confiabilidade superior a 50%. Esta variação não considerável das massas específicas é esperada, uma vez que, tanto a limalha como a fibra são de aço, sendo as pequenas variações obtidas decorrentes da geometria do resíduo.

4.4.3.2 Resistência a compressão

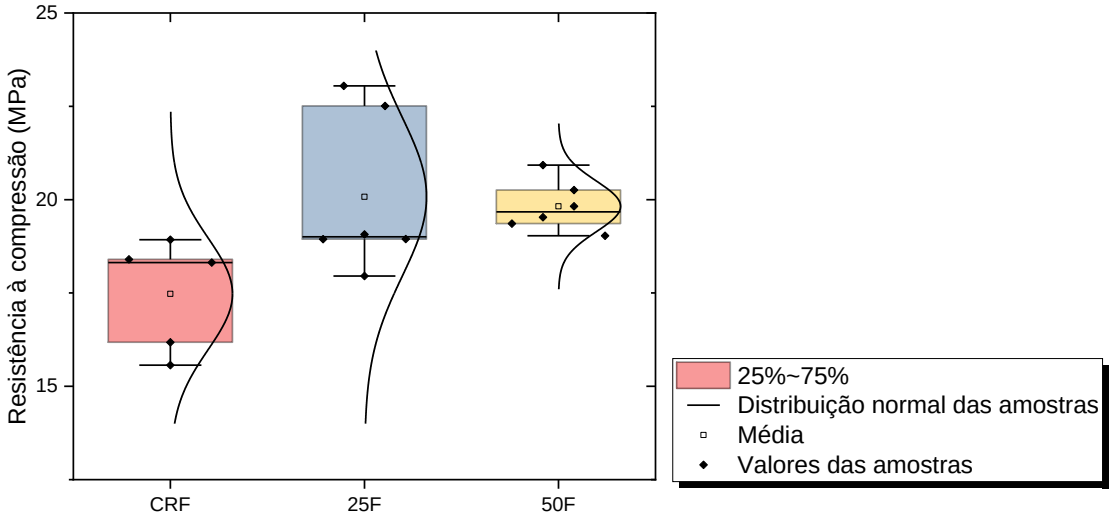
Todas as substituições apresentaram aumento na resistência à compressão do concreto, tendo a amostra de referência obtido como média de 18,36 MPa, com as substituições de 25% e 50% possuindo os valores de 20,08 MPa e 19,82 MPa, com os resultados para cada amostra expressos na Figura 4.80 e Tabela 4.40.

Tabela 4.40 – Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de fibras de aço

Resistência à compressão 28 dias		
Traço	Resistência (MPa)	Variação em relação a referência
CRF	18,36	-
25F	20,08	9,35%
50F	19,82	7,95%

Fonte: Autor (2023)

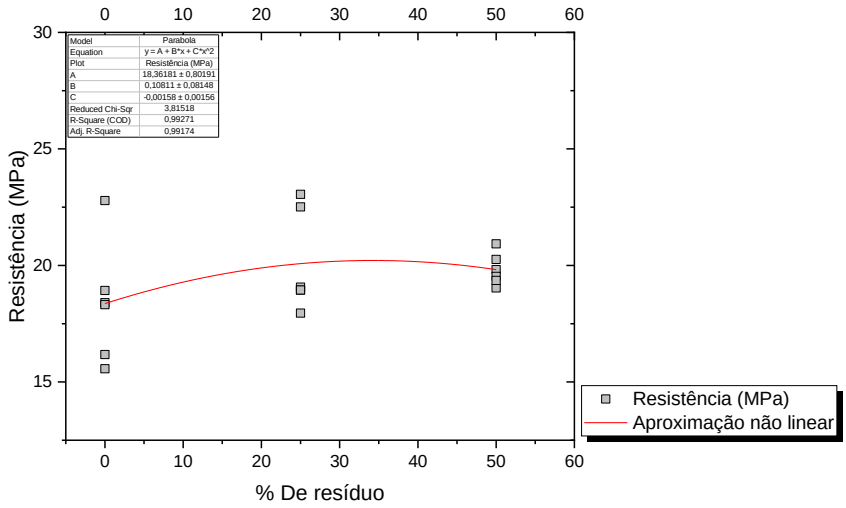
Figura 4.80 – Resistência a compressão aos 28 dias das substituições de fibras de aço



Fonte: Autor (2023)

Com grau de confiabilidade de 95% é possível afirmar que houve de fato a melhora na resistência a compressão dos concretos produzidos, a aproximação não linear realizada possui fator R^2 de 0,9 e pode ser observada na Figura 4.81 abaixo:

Figura 4.81 – Resistência a compressão em relação ao teor de substituição de fibras de aço



Fonte: Autor (2023)

De acordo com o observado na curva acima, é possível determinar que as melhores substituições estão entre as faixas de 30% e 40%, considerando o teor inicial de adição de fibra de 40 kg/m³ de concreto ou aproximadamente 1% em relação ao volume de concreto produzido.

A melhora na resistência a compressão do concreto quando utilizado a limalha de aço

como fibra é observado em diversas pesquisas, tais como a de Shewalul (2021), que obteve até 30,7% de melhora quando utilizado a limalha como adição de 0,75% em relação ao volume de concreto, Purohit; Dulawat e Ahmad (2020), também utilizaram a limalha como fibra e obtiveram melhoras de 3,0%, 4,0% e 20%, para os teores de 0,5%. 1,0% e 1,5% em relação ao volume de concreto. Prasad *et al.* (2020) obtiveram melhoras de 3,2% e 10,3% nos teores de 1,0% e 1,5% em relação ao volume de concreto.

Considerando que o adensamento e relação água cimento de todos os traços são semelhantes, o fator que pode justificar este incremento na resistência a compressão é o tipo e granulometria dos agregados de cada mistura, ou seja, a limalha de aço estaria melhorando a qualidade dos agregados presentes no concreto.

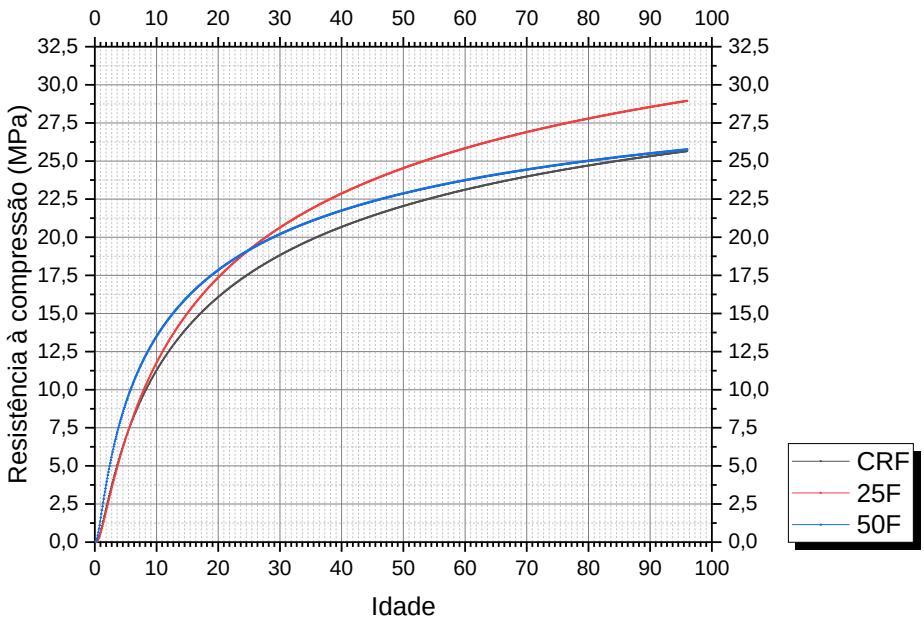
A evolução das resistências é vista na Figura 4.82, com curva confeccionada novamente a partir da formulação da NBR 6118 (ABNT, 2023), com valores de acordo com a Tabela 4.41.

Tabela 4.41 – Evolução da resistência à compressão para as substituições de fibras metálicas

Resistência à compressão 91 dias		
Traço	Resistência (MPa)	Variação em relação a referência
CRF	25,64	-
25F	28,95	12,87%
50F	25,76	0,44%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.82 – Evolução da resistência à compressão para as substituições de fibras metálicas



Fonte: Autor (2023)

Foi observado nas amostras que com o aumento das idades há a tendência da resistência a compressão se igualar entre “CRF” e “50F”, enquanto o aumento visto por “25F” se mantêm mesmo em idades mais avançadas, estas observações são validadas conforme as curvas desenvolvidas com os preceitos normativos.

4.4.3.3 Resistência à tração indireta

Assim como a compressão, o aumento da tração indireta em concretos produzidos utilizando a limalha de aço como fibra é observada em diversas pesquisas, Prasad *et al* (2020), observou para os teores de 1,0% e 1,5% (em relação ao volume de concreto) aumentos na resistência a tração de 3,2% e 10,3%, assim como Maanvit *et al.* (2019) que para os teores de 1,0% e 1,5% observaram um aumento de 30% e 75% respectivamente, porém estas pesquisas não utilizaram os resíduos juntamente com fibras comerciais.

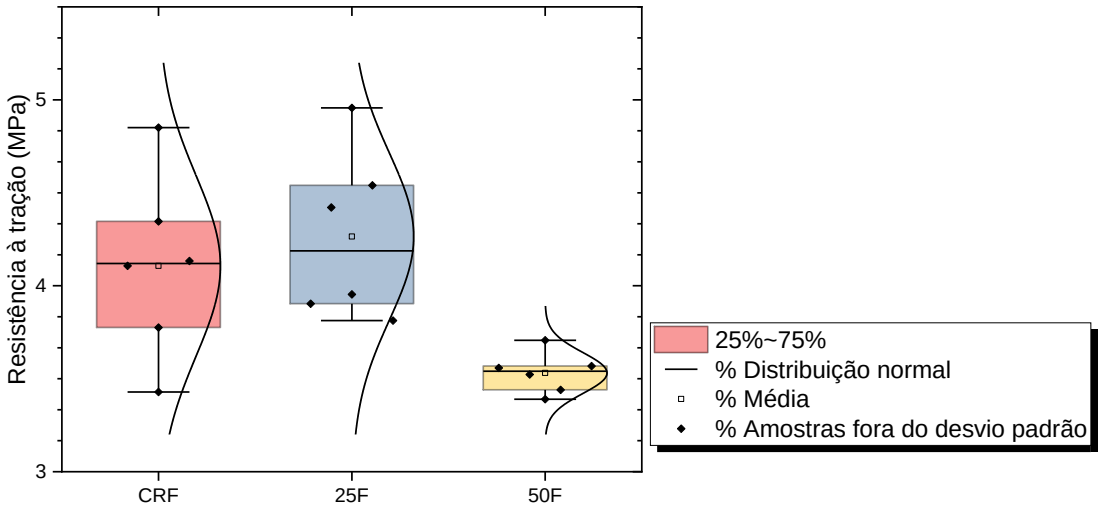
Com relação ao traço de referência que obteve um média de 4,11 MPa de resistência a tração, a substituição de 25% obteve um aumento de 3,84% enquanto a de 50% houve o decréscimo de 14,02%. Conforme valores observados no gráfico da Figura 4.83 e Tabela 4.42.

Tabela 4.42 – Resistência a tração indireta aos 28 dias das substituições de fibras de aço

Resistência à tração 28 dias		
Traço	Resistência (MPa)	Variação em relação a referência
CRF	4,11	-
25F	4,26	3,84%
50F	3,53	-14,02%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.83 – Resistência a tração indireta aos 28 dias das substituições de fibras de aço

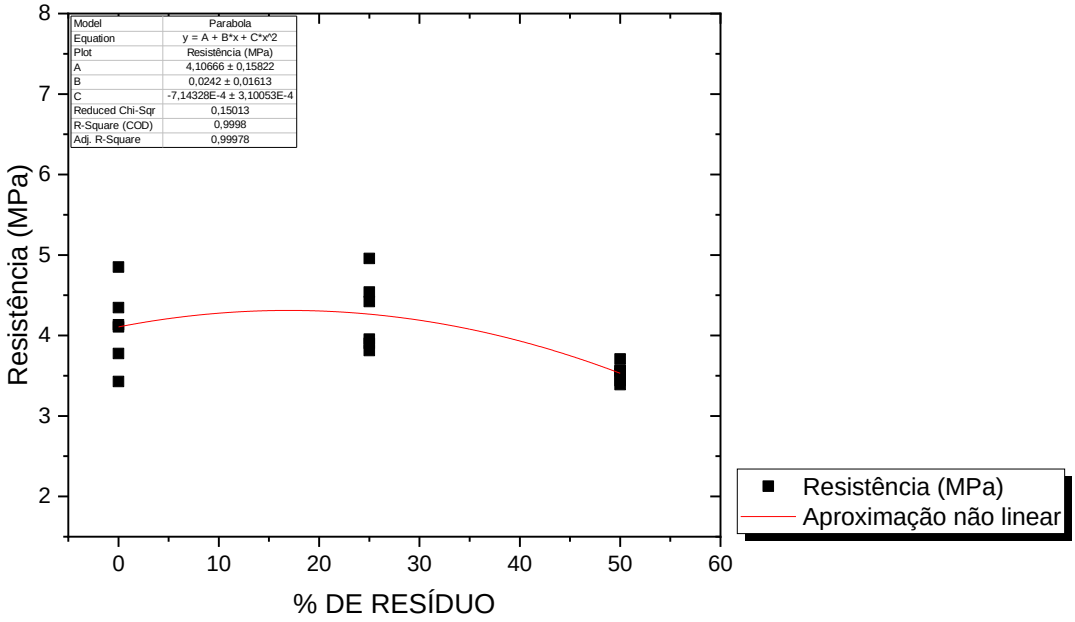


Fonte: Autor (2023)

A análise de variância de média não obteve grau de confiabilidade considerável entre as amostras de referência e de 25%, estatisticamente estas podem ser consideradas semelhantes, porém a de 50% obteve a confiabilidade de 95%.

A aproximação não linear está contida na Figura 4.84 e possui valor para o fator R^2 de 0,9998.

Figura 4.84 – Resistência a tração em relação ao teor de substituição de fibras de aço



Fonte: Autor (2023)

É possível dizer que a substituição da fibra por limalha de aço tende a diminuir a resistência a tração do concreto a partir de 20%, sendo que para teores menores que este os resíduos podem auxiliar marginalmente no efeito ponte das fibras, uma vez que estes materiais irão atuar em aberturas de fissuras diferentes das quais a fibra irá atuar, também deve considerar o efeito de ancoragem das fibras comerciais, o qual auxilia não só no aumento da resistência como para o controle de fissuração.

Fibras são materiais que tendem a melhorar a resistência à tração do concreto, a redução deste parâmetro para teores maiores implica que os resíduos possam estar atuando como agregado, principalmente por conta da geometria em arco escolhida para este estudo.

4.4.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico – NBR 8802 (Ultrassom)

A velocidade de propagação das ondas de ultrassom obtida para cada traço pode ser vista na Tabela 4.43 abaixo:

Tabela 4.43 – Velocidade das ondas de ultrassom – Substituição de fibras de aço

Traço	Velocidade de propagação de onda de ultrassom média (km/s)	Variação	Desvio Padrão
CRF	4,32	0,00%	0,06
25F	4,42	2,28%	0,04
50F	4,48	3,70%	0,03

Fonte: Autor (2023)

A variação na velocidade de ultrassom observada para os três traços se mostrou baixa, sendo que todos os traços possuíram classificação semelhante quanto ao concreto produzido, estando na faixa “ótima” de acordo com Figura 4.16.

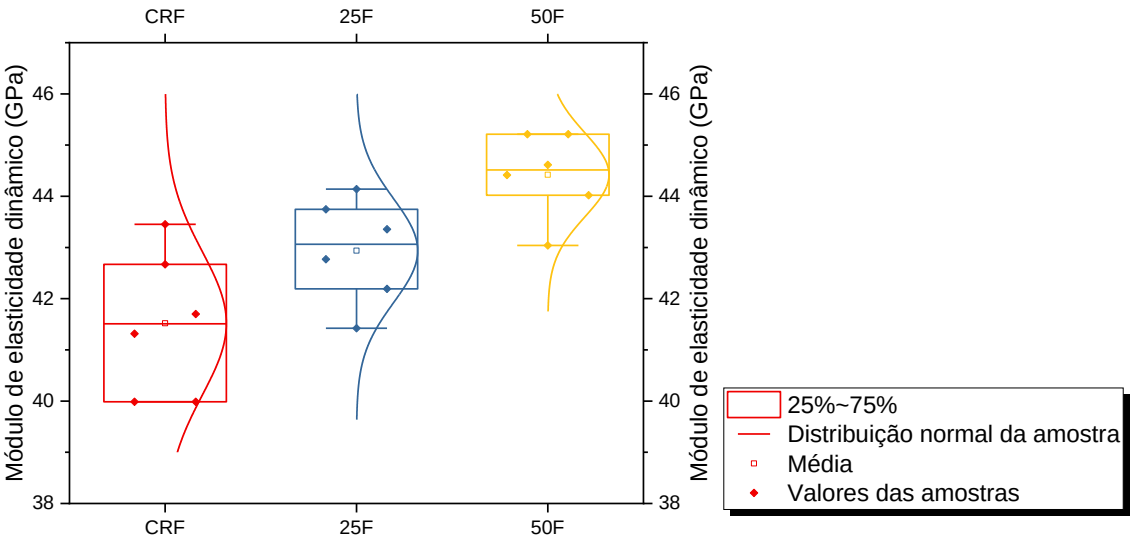
Foi determinado assim o módulo de elasticidade do concreto, para o de referência possuindo 41,52 GPa, aumentando em 3,42% e 7,99% para as substituições de 25% e 50% respectivamente, os valores obtidos estão representados a seguir na Figura 4.85 e Tabela 4.44:

Tabela 4.44 – Módulo de elasticidade para cada substituição de fibras

Módulo de elasticidade por ultrassom		
Traço	Módulo dinâmico (GPa)	Variação em relação a referência
CRF	41,52	-
25F	42,94	3,42%
50F	44,42	6,99%

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.85 – Módulo de elasticidade para cada substituição de fibras

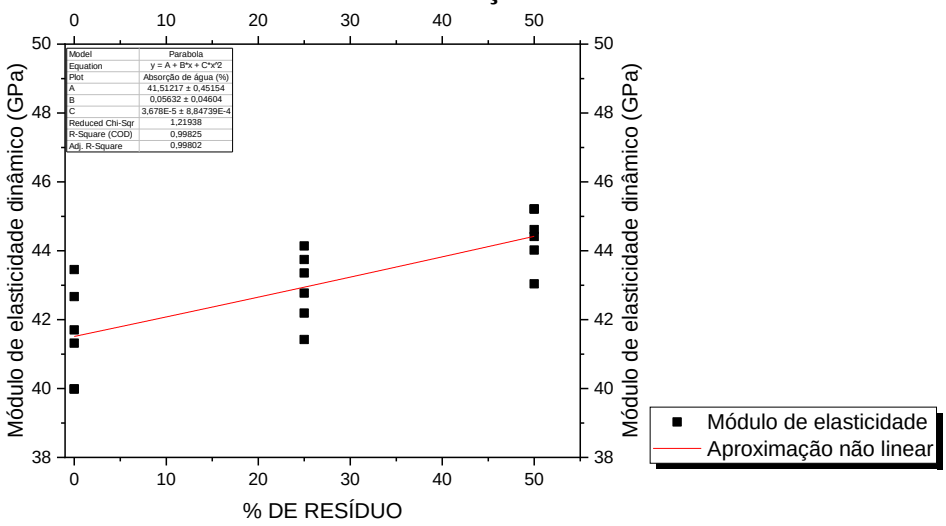


Fonte: Autor (2023)

Este aumento do módulo de elasticidade pode ser consequência da atuação da limalha de aço como agregado do concreto, visto que, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), dos principais fatores que podem influenciar no módulo de elasticidade, um destes é o tipo, granulometria e qualidade dos agregados presentes na mistura.

A análise de variância de médias obteve um valor para a confiabilidade de 90%, a realização da aproximação linear obteve fator R^2 de 0,99825 e pode ser observada na Figura 4.86. É observado que, dentro da faixa de estudo realizada, quanto maior o percentual de limalha de aço maior tende a ser também o módulo de elasticidade dinâmico.

Figura 4.86 – Módulo de elasticidade dinâmico por teor de substituição de fibras de aço



Fonte: Autor (2023)

4.4.3.5 Módulo de elasticidade dinâmico – NBR 8522-2 *(Sonelastic)*

Para o módulo de elasticidade dinâmico obtido através da leitura da frequência de vibração do concreto, foram observadas apenas variações marginais, com análise estatística realizada não obtendo grau de confiabilidade alto o suficiente de variação das médias das amostras.

Em relação a referência, a substituição de 25% diminuiu a média deste parâmetro em 1,42%, e um pequeno aumento de 0,26% para a substituição de 50%, os valores médios das amostras estão contidos na Tabela 4.45.

Tabela 4.45 – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)* por teor de substituição de fibras de aço

Módulo de elasticidade com Sonelastic		
Traço	Módulo dinâmico (GPa)	Variação em relação a referência
CRF	36,86	-
25F	36,34	-1,42%
50F	36,95	0,26%

Fonte: Autor (2023)

Não foram realizadas aproximações lineares ou não lineares, uma vez que, estatisticamente todos os traços pertencem a uma mesma família de amostragem.

De tal forma, é possível notar que, a incorporação de limalha de aço não alterou os valores de módulo de elasticidade dinâmico através da captação da frequência natural de vibração do concreto.

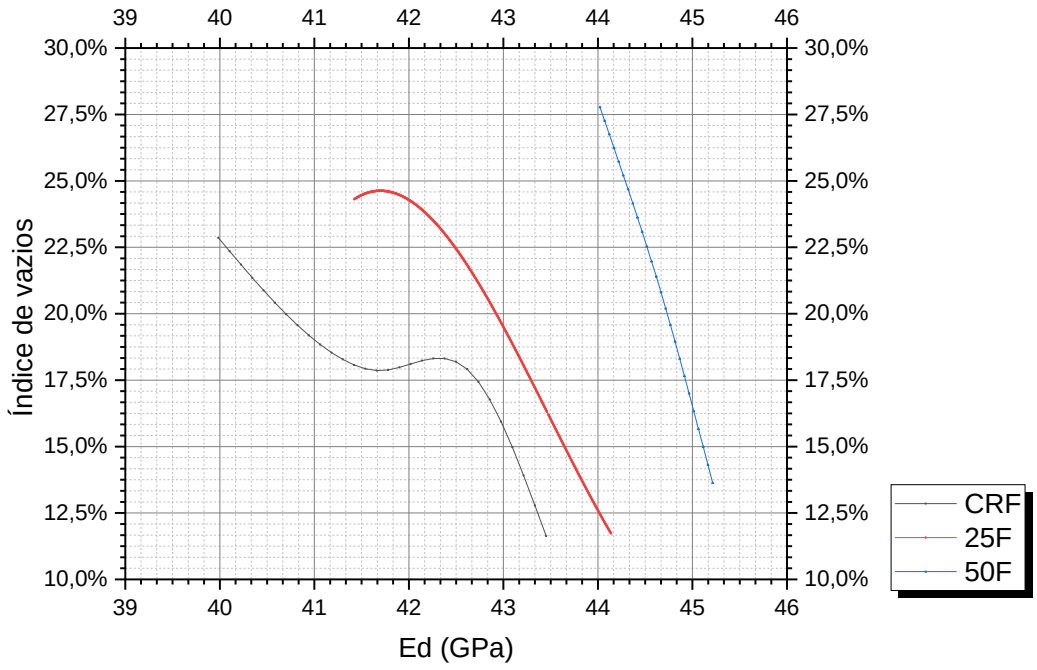
Em comparação, o ensaio anterior demonstrou tendência de crescimento deste parâmetro, porém, assim como nesta metodologia, as variações se mostraram baixas, esta variabilidade pode estar relacionada aos preceitos utilizados em cada ensaio, em que, os valores são influenciados por alguns fatores, destes, o tipo de agregado utilizado e a heterogeneidade do concreto produzido, a natureza de variabilidade do tamanho e forma dos resíduos juntamente com as fibras, podem ocasionar esta diferença entre os dois ensaios.

4.4.3.6 Correlações entre as resistências obtidas e os módulos de elasticidade

As correlações realizadas entre propriedades do concreto foram realizadas de maneira semelhante ao visto nas substituições de agregados, todas as aproximações não lineares apresentadas neste capítulo possuem o fator R^2 superior a 0,97.

A relação entre o módulo dinâmico com o índice de vazios do concreto é mostrada na Figura 4.87 abaixo.

Figura 4.87 – Índice de vazios X Módulo dinâmico (Ultrassom)



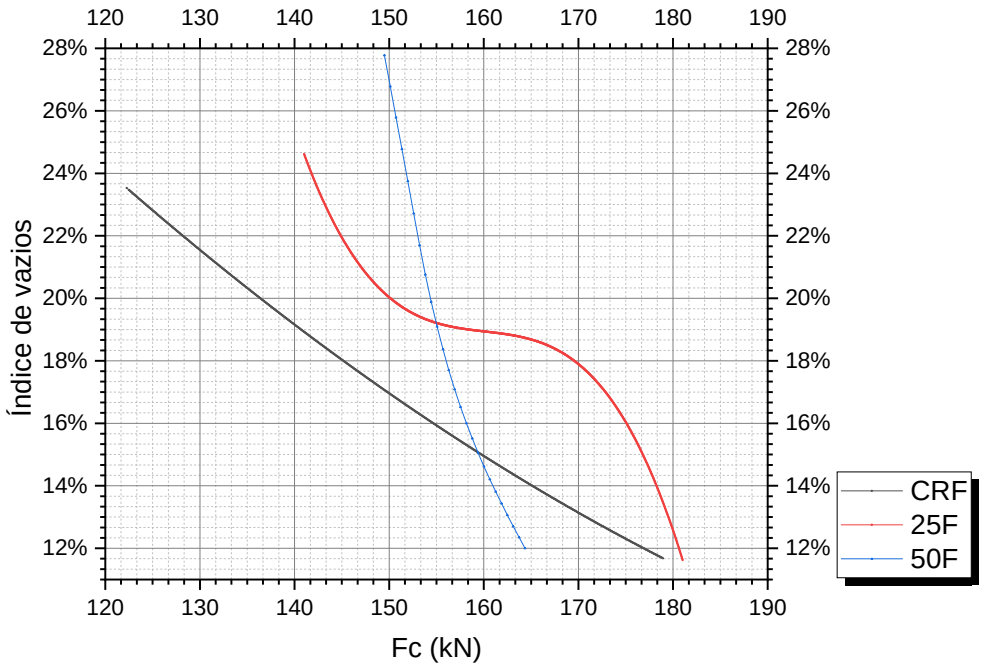
Fonte: Autor (2023)

As curvas obtidas foram decrescentes, demonstrando que, quanto menor o índice de vazios, menor também é a qualidade do concreto produzido e seu módulo de elasticidade, é visto que, o impacto do índice de vazios e no módulo foi expressivo no concreto sem as limalhas de aço. O aumento do teor de incorporação ocasionou uma redução do efeito do índice de vazios no módulo de elasticidade dinâmico, ou seja, mesmo as variações deste primeiro parâmetro serem semelhantes entre os traços, a alteração do módulo é menor quanto maior o teor de limalhas de aço.

Relacionando o índice de vazios com a carga de ruptura a compressão do concreto, obtêm-se resultados e considerações semelhantes as ditas anteriormente, a inserção da limalha de aço no concreto tende a diminuir o efeito do índice de vazios nas propriedades mecânicas, pode se dizer que, conforme o aumento de resíduos no concreto, maior será a qualidade dos agregados da mistura.

A correlação entre o índice de vazios e carga de ruptura a compressão está representada na Figura 4.88.

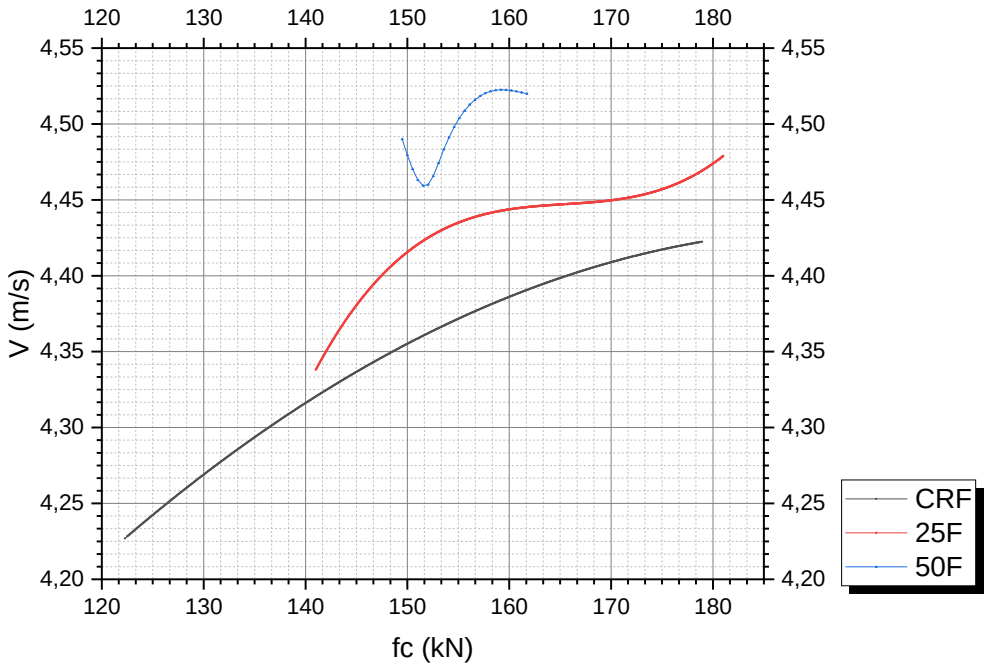
Figura 4.88 – Índice de vazios X Carga de ruptura à compressão



Fonte: Autor (2023)

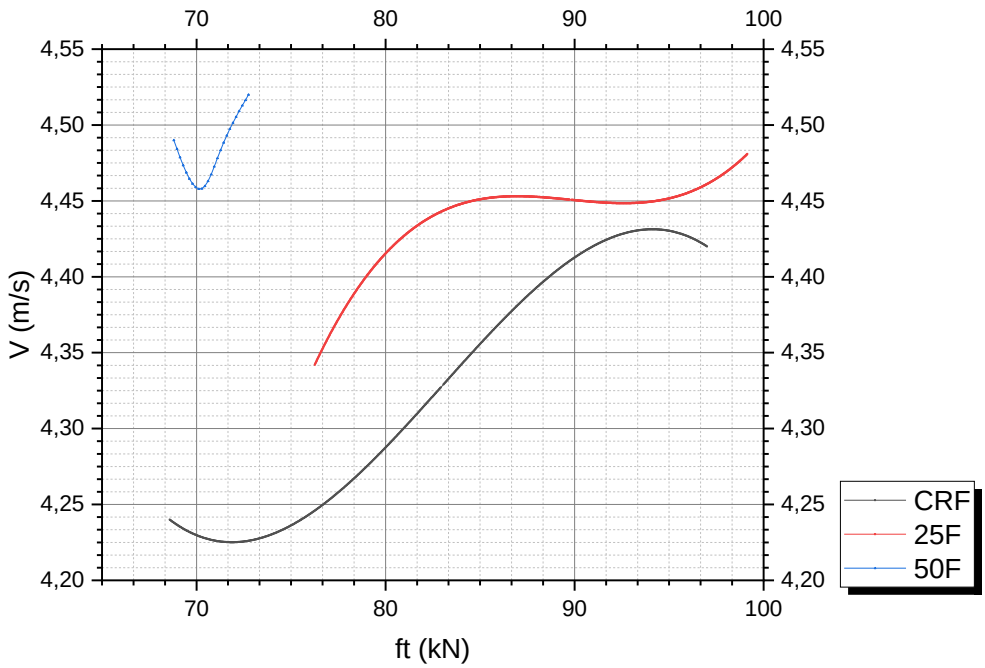
A relação entre as cargas de ruptura à tração e compressão com a velocidade de propagação de ondas de ultrassom está demonstrada nos gráficos das Figuras 4.89 e 4.90.

Figura 4.89 –Velocidade de propagação de ondas de ultrassom X Carga de ruptura à compressão



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.90 –Velocidade de propagação de ondas de ultrassom X Carga de ruptura à tração



Fonte: Autor (2023)

Observando as Figuras 4.89 e 4.90 acima, é possível observar duas principais características da inserção de limalha de aço no concreto reforçado com fibras; a primeira relacionada a qualidade do concreto, que aumenta conforme o aumento do teor de incorporação; a segunda com relação a variabilidade, é notável que, apesar da geometria das limalhas de aço não ser padronizada, o aumento do teor ocasiona o diminuição na variação dos resultados, implicando novamente em concretos de maior qualidade e confiabilidade em suas propriedades, é possível observar também que, a presença da limalha de aço pode ocasionar uma melhora na distribuição granulométrica da fibra metálica comercial.

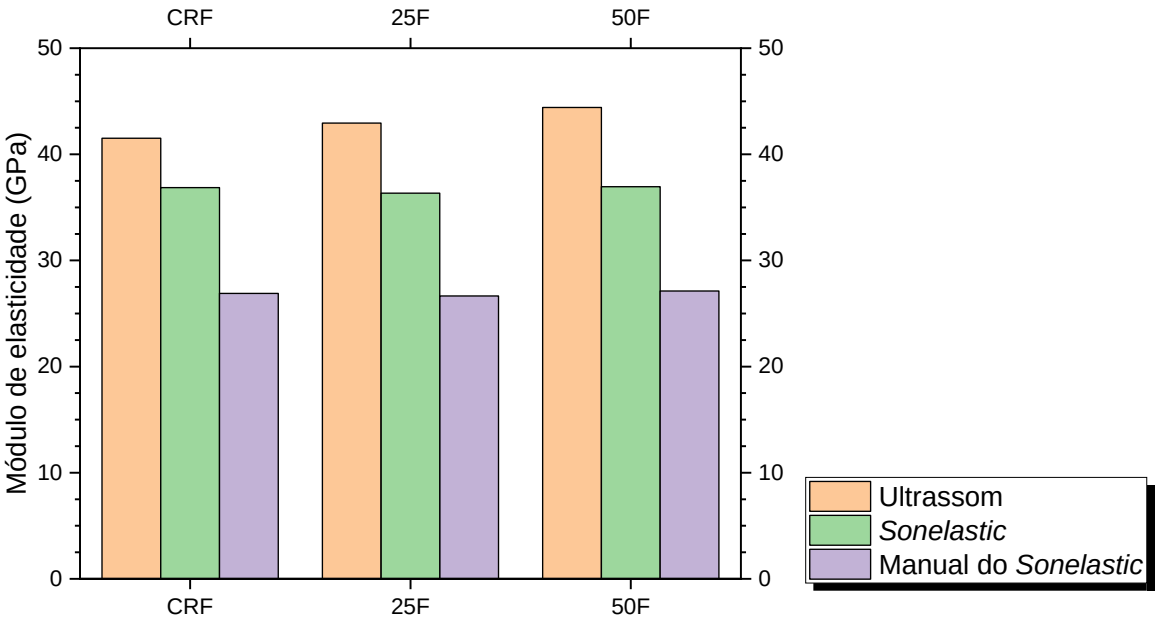
Por fim foi realizada a comparação dos valores de módulos obtidos conforme Tabela 4.46 e Figura 4.91.

Tabela 4.46 –Módulos de elasticidade obtidos para as substituições de fibras de aço

Traço	Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)	Módulo de elasticidade dinâmico (Sonelastic)	Módulo de elasticidade estático (Manual)
CRF	41,52	36,86	26,89
25F	42,94	36,34	26,66
50F	44,42	36,95	27,13

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.91 –Módulos de elasticidade obtidos para as substituições de fibras de aço



Fonte: Autor (2023)

Em conformidade com o já observado nas substituições anteriores, o módulo de elasticidade pelo método do ultrassom apresenta valores maiores, porém o comportamento se dá semelhante entre todas as metodologias, com incremento pouco expressivo dos módulos de elasticidade conforme aumento do teor de resíduos no concreto.

4.4.3.7 Análise dos corpos de prova após imersão em solução agressiva

Quanto às mudanças de massa nos corpos de prova antes e após a imersão, não foram observadas em nenhuma solução alterações estatisticamente significativas entre as amostras, comportamento semelhante ao visto nas substituições de agregado miúdo e graúdo . Pode-se afirmar que a imersão em soluções agressivas não provocou uma alteração substancial na massa de qualquer amostra, as variações identificadas estão detalhadas na Tabela 4.47 abaixo.

Tabela 4.47 – Variações das massas dos corpos de prova (substituição de fibras de aço) – Antes e após imersão

	Variações das massas dos corpos de prova		
	CRF	25F	50F
Solução de 5% de sulfato de sódio	2,17%	3,18%	2,47%
de sódio	3,92%	1,78%	1,50%
CP - Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio	1,96%	4,48%	1,60%

Fonte: Autor (2023)

Nenhuma alteração significativa nas dimensões dos corpos de prova foi averiguada, com valor máximo de alteração de diâmetro, sendo uma redução de 0,10 milímetro no traço "CRF" na solução de 10% de sulfato de sódio e diminuição de altura de 0,13milímetros no traço "50F" também na mesma solução.

4.4.3.7.1 Solução de 5% de sulfato de sódio – Propriedade mecânicas

Os valores médios das amostras bem como as variações obtidas entre os traços de referência e os atacados estão contidos na Tabela 4.48 abaixo:

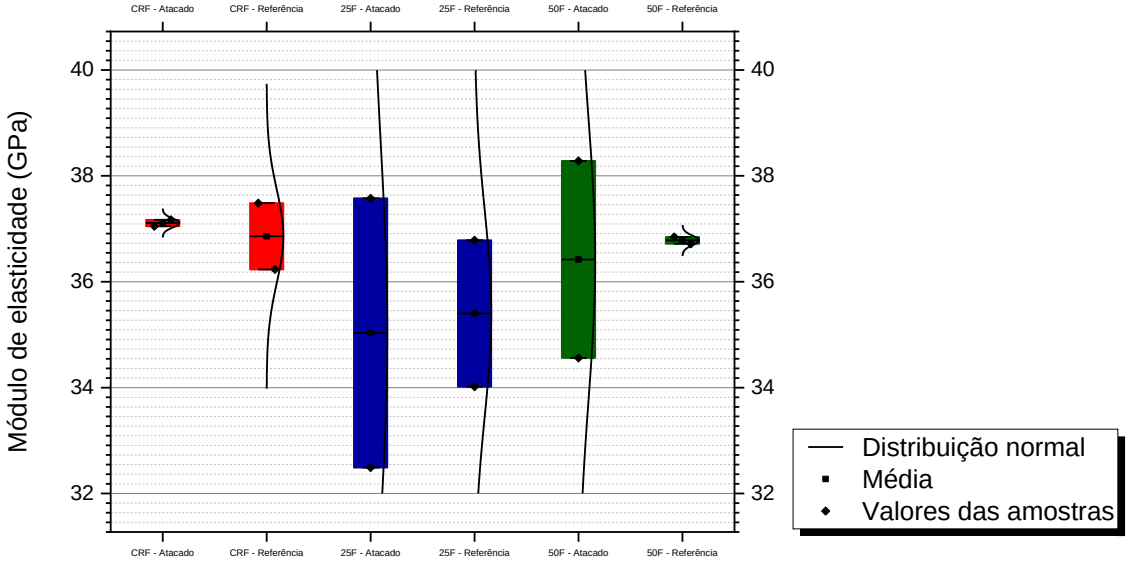
Tabela 4.48 - Propriedades mecânicas das substituições de fibras – Solução de 5% de sulfato de sódio.

	CP - Solução de 5% de sulfato de sódio		
	CRF	25F	50F
Resistência à compressão (180 Dias)	22,27	23,20	17,29
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	43,85	42,21	41,41
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	36,45	32,49	36,78
	CP - Referência		
	CRF	25F	50F
Resistência à compressão (180 Dias)	26,07	24,15	23,00
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	40,64	40,11	43,36
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	36,86	35,40	36,16
	Variações entre "Atacados" com "Referência"		
	CRF	25F	50F
Resistência à compressão (180 Dias)	-14,58%	-3,93%	-24,83%
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom	7,90%	5,24%	-4,50%
Módulo de elasticidade dinâmico - Sonelastic	-1,11%	-8,22%	1,71%

Fonte: Autor (2023)

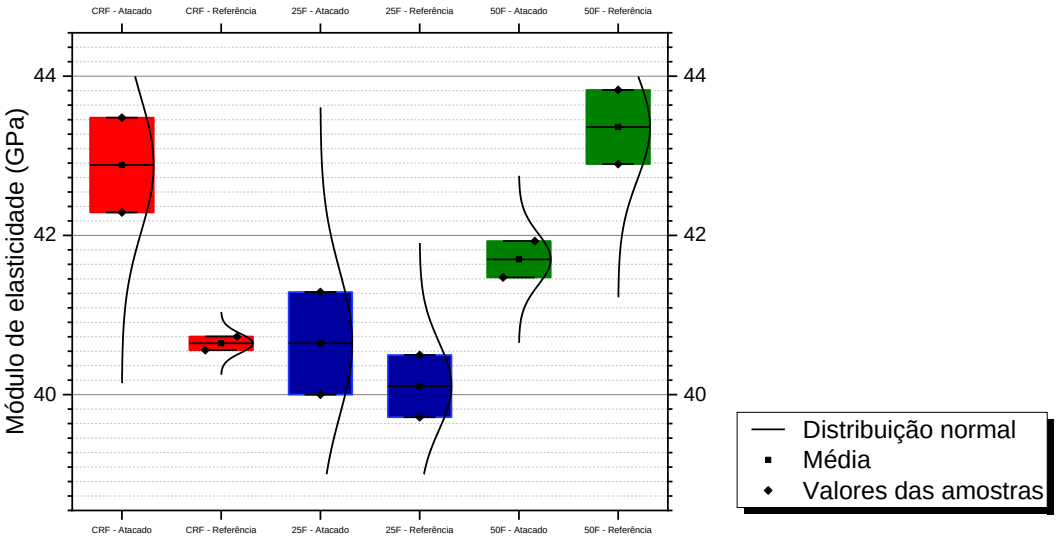
Os valores obtidos do módulo de elasticidade dinâmico através do ensaio de ultrassom e do *Sonelastic* podem ser observados nos gráficos representados na Figura 4.92 e 4.93.

Figura 4.92 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.93 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)



Fonte: Autor (2023)

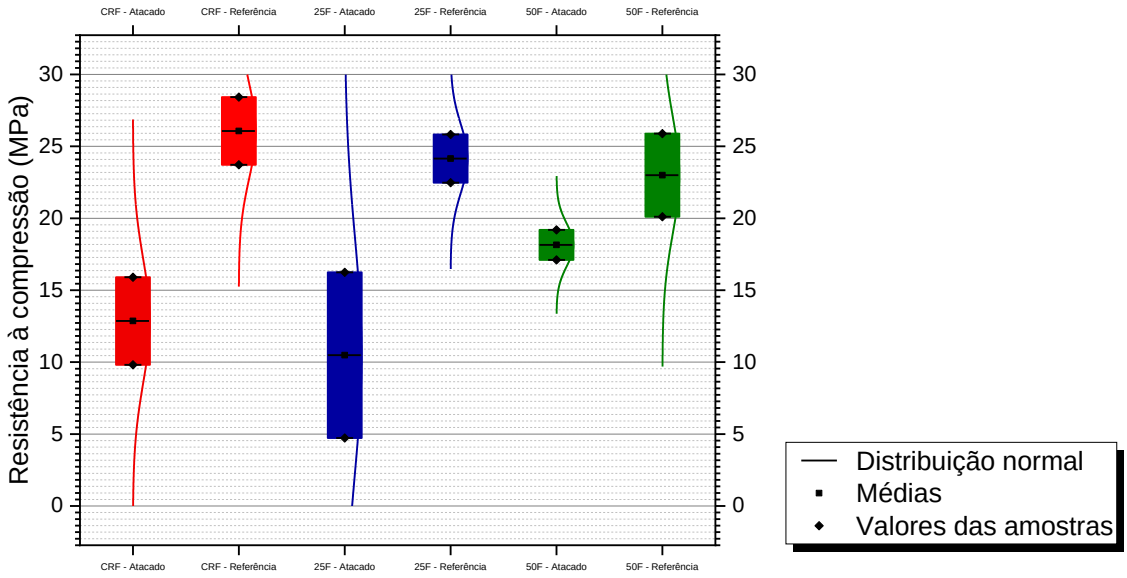
Os traços “25F” e “50F” pouca variabilidade no módulo de elasticidade dinâmico, indicando pouca atuação desta solução neste parâmetro, enquanto “CRF” teve um pequeno acréscimo pelas duas metodologias, demonstrando que, para este traço, não houve deterioração desta propriedade do concreto pela imersão na solução de 5% de cloreto de sódio.

A resistência à compressão foi reduzida em todos os traços, notoriamente no traço “50F”, indicando maior efeito da solução.

A menor redução está presente no traço “25F”, é possível observar que, a presença do aço no concreto reduz a sua resistência à compressão frente a imersão na solução de 5% de cloreto de sódio, porém a presença de limalha em poucas proporções atenua este efeito, por conta da redução do comprimento geral de aço inserido no concreto, que dificulta o progresso da deterioração.

Os valores obtidos estão representados na Figura 4.94:

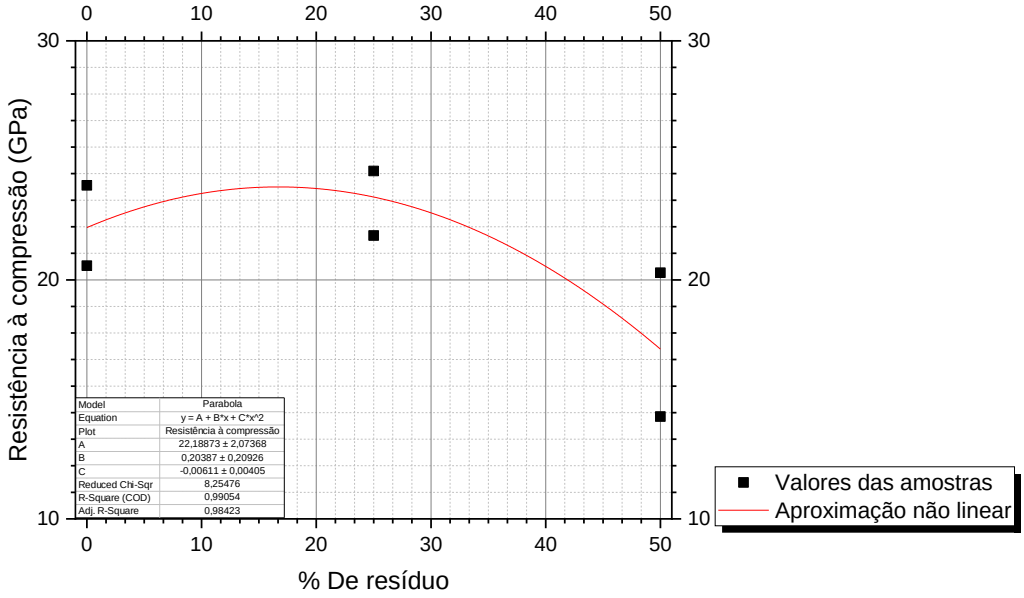
Figura 4.94 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Resistência a compressão



Fonte: Autor (2023)

A aproximação não linear da resistência por teor de incorporação dos corpos de prova atacados está representado na Figura 4.95, possuindo fator R^2 de 0,99054:

Figura 4.95 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de fibras de aço) – Solução de 10% de sulfato de sódio.



Fonte: Autor (2023)

O formato do gráfico é semelhante ao da Figura 4.80, ou seja, mesmo após a imersão na solução de 5% de sulfato de sódio, é possível observar o aumento da resistência à compressão em proporções próximas de 20%.

Em resumo o comportamento mecânico de cada traço para a solução de 5% de sulfato de sódio foi:

- CRF (0%): Pequeno aumento no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco ou nenhum efeito da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão;
- 25F (25%): Pouca variação no valor do módulo de elasticidade com a idade, efeito pouco expressivo da solução neste parâmetro; menor diminuição da resistência à compressão;
- 50F (50%): Pouca variação no valor do módulo de elasticidade com a idade, efeito pouco expressivo da solução neste parâmetro; maior diminuição da resistência à compressão;

4.4.3.7.2 Solução de 10% de sulfato de sódio – Propriedade mecânicas

Os valores e variações obtidos para os corpos de prova imersos na solução de 10% de sulfato de sódio estão contidos na Tabela 4.49 abaixo:

Tabela 4.49 – Propriedades mecânicas das substituições de fibras – Solução de 10% de sulfato de sódio.

	CRF	25F	50F
Resistência à compressão (180 Dias)	12,86	10,48	18,15
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	31,25	27,35	39,92
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	23,51	18,24	35,49

CP - Referência

	CRF	25F	50F
Resistência à compressão (180 Dias)	26,07	24,15	23,00
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	40,64	40,11	43,36
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	36,86	35,40	36,16

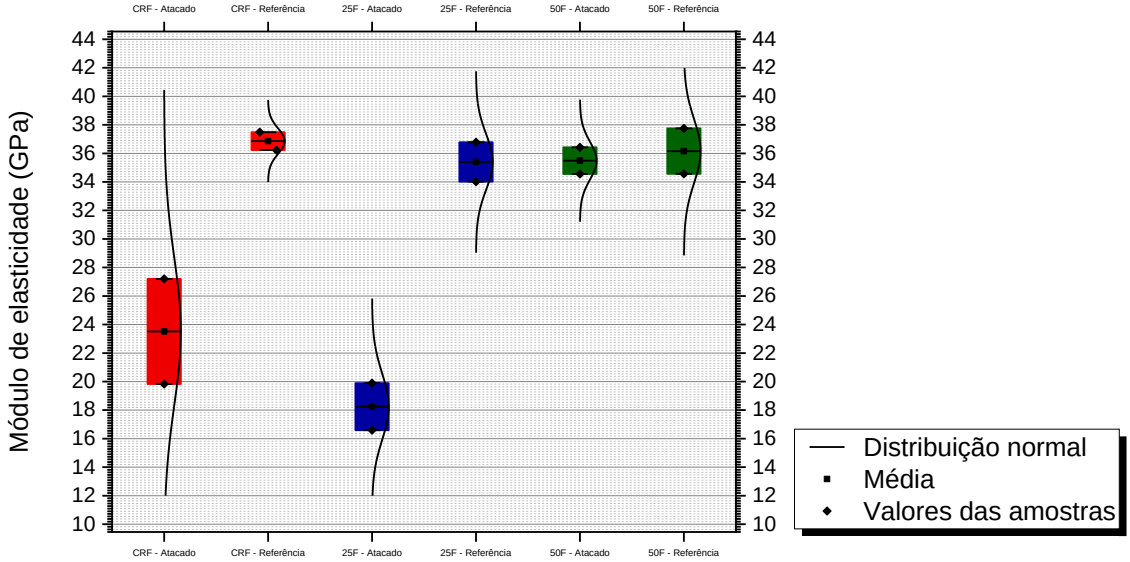
Variações entre "Atacados" com "Referência"

	CRF	25F	50F
Resistência à compressão (180 Dias)	-50,67%	-56,60%	-21,09%
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom	-23,10%	-31,82%	-7,94%
Módulo de elasticidade dinâmico - Sonelastic	-36,21%	-48,48%	-1,85%

Fonte: Autor (2023)

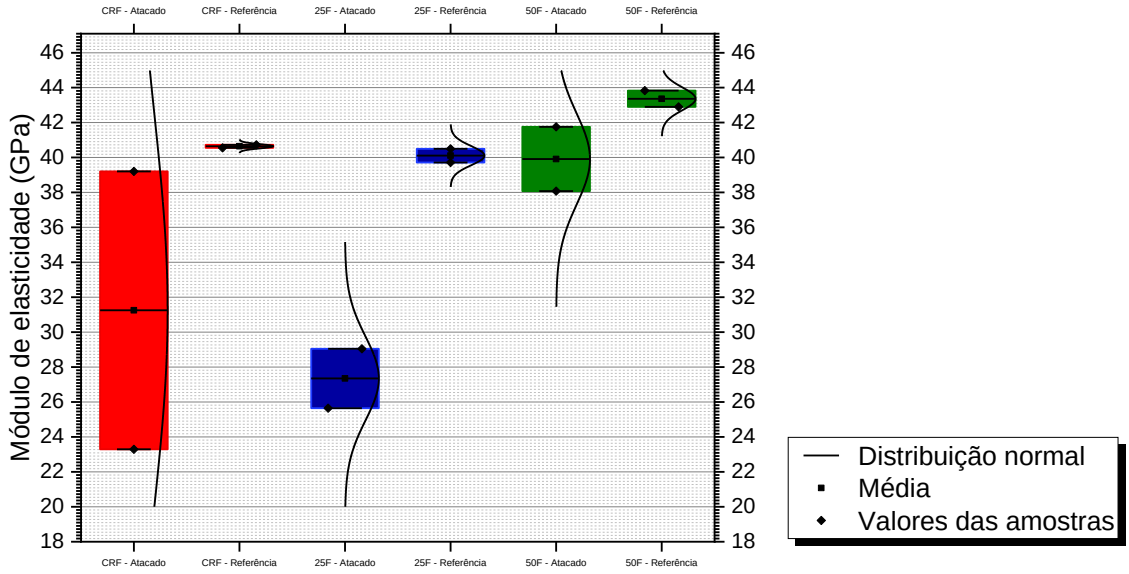
É possível observar os valores amostrais para o módulo de elasticidade dinâmico nas Figuras 4.96 e 4.97:

Figura 4.96 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.97 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)

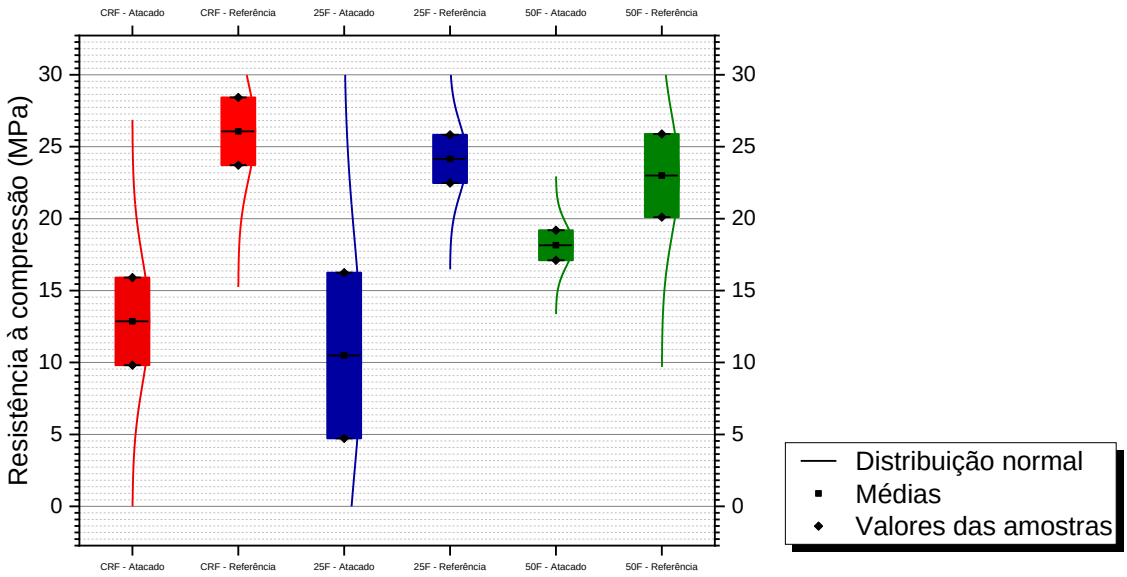


Fonte: Autor (2023)

Os valores e variações obtidas tanto pelo ensaio utilizando de *Sonelastic* quanto pelo método do ultrassom se mostraram coerentes entre si, foram observadas grandes decréscimos no módulo de elasticidade dinâmico do concreto em todos os traços, o traço “50F” obteve a menor redução, mas ainda sim considerável, demonstrando grande sensibilidade dos traços com fibras para esta solução.

Para a resistência à compressão, os decréscimos também foram observados em todos os traços, de maneira semelhante ao módulo de elasticidade dinâmico, com o traço “50F” obtendo a menor redução. Os valores amostrais estão contidos abaixo na Figura 4.98.

Figura 4.98 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Resistência à compressão



Fonte: Autor (2023)

De maneira geral então é possível afirmar que os concretos com fibras de aço são mais sensíveis a esta solução do que o concreto convencional, porém é possível notar também que, a presença do resíduo não prejudicou a deterioração do concreto reforçado com fibras imerso na solução de 10% de sulfato de sódio, essa ocorrendo de maneira semelhante ao traço de referência e sendo amenizada com teores maiores de limalha de aço.

Em resumo as propriedades mecânicas obtidas por traço foram:

- CRF (0%): Diminuição expressiva no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando grande efeito da solução neste parâmetro assim como diminuição da resistência à compressão;
- 25F (25%): Diminuição expressiva no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando grande efeito da solução neste parâmetro assim como diminuição da resistência à compressão, com valores de decréscimos semelhantes ao traço de referência;
- 50F (50%): Diminuição expressiva no módulo de elasticidade dinâmico com a idade,

implicando grande efeito da solução neste parâmetro assim como diminuição da resistência à compressão, com valores de decréscimos menores que o traço de referência;

4.4.3.7.3 Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio – Propriedade mecânicas

Os valores médios obtidos juntamente com as variações dos corpos de prova imersos em solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio estão representados na Tabela 4.50 abaixo.

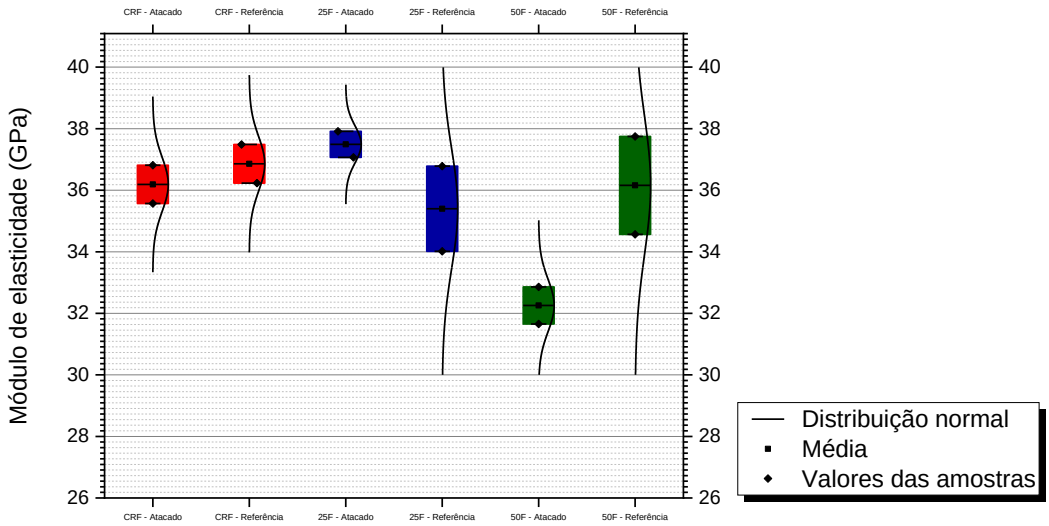
Tabela 4.50 – Propriedades mecânicas das substituições de fibras – Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio.

	CP - Solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio		
	CRF	25F	50F
Resistência à compressão (180 Dias)	15,27	17,96	16,17
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	42,90	44,57	40,04
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	36,19	37,49	32,26
	CP - Referência		
	CRF	25F	50F
Resistência à compressão (180 Dias)	26,07	24,15	23,00
Módulo de elasticidade dinâmico - *Ultrassom*	40,64	40,11	43,36
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic*	36,86	35,40	36,16
	Variações entre "Atacados" com "Referência"		
	CRF	25F	50F
Resistência à compressão (180 Dias)	-41,43%	-25,63%	-29,70%
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom	5,56%	11,12%	-7,66%
Módulo de elasticidade dinâmico - Sonelastic	-1,82%	5,90%	-10,79%

Fonte: Autor (2023)

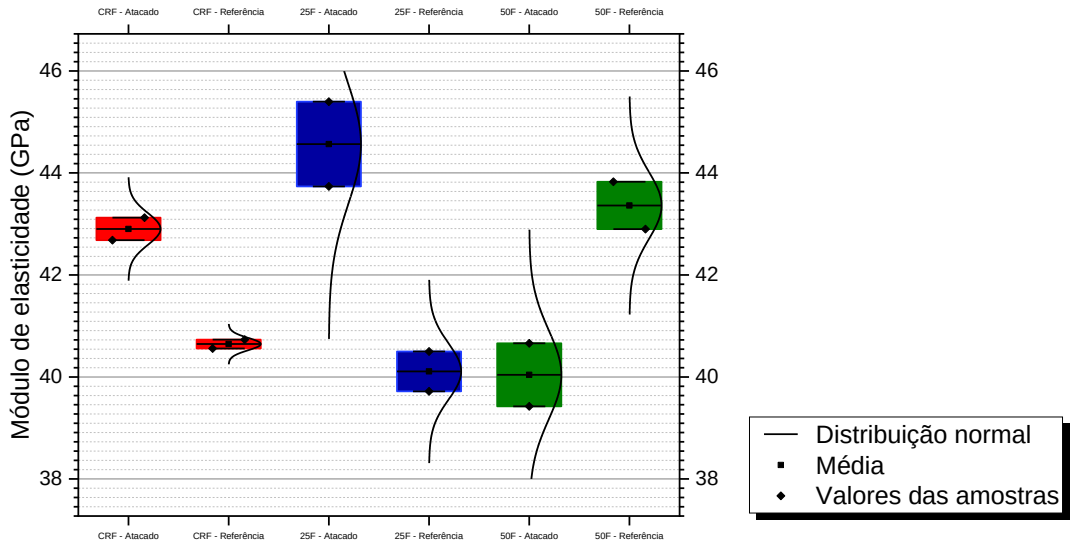
Os valores amostrais para o módulo de elasticidade dinâmico estão presentes nas Figuras 4.99 e 4.100.

Figura 4.99 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Módulo de elasticidade dinâmico (*Sonelastic)*



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.100 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Módulo de elasticidade dinâmico (Ultrassom)



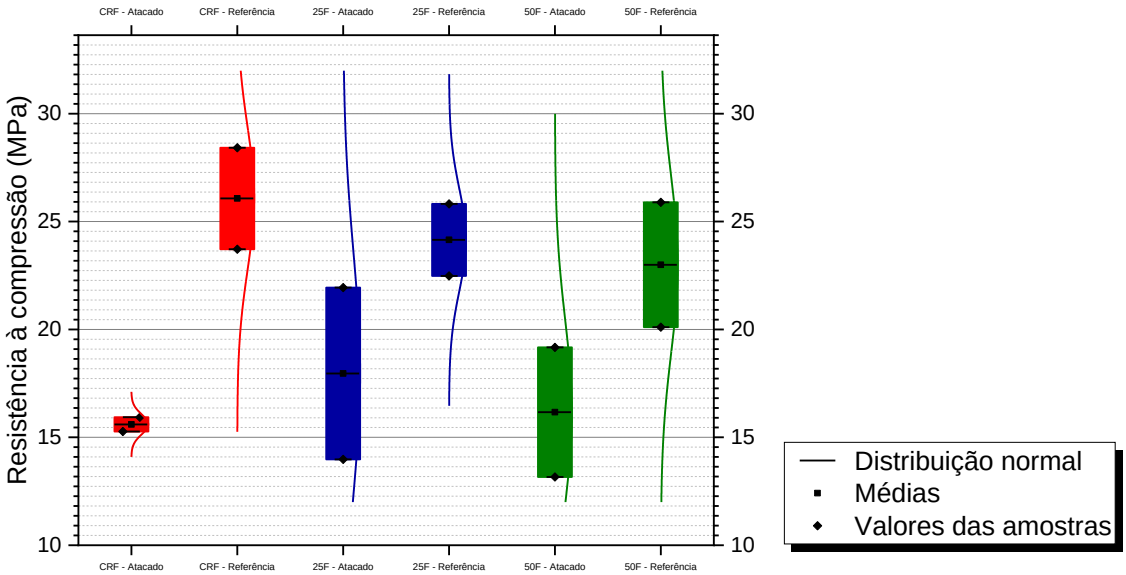
Fonte: Autor (2023)

No geral houve acréscimo desta propriedade nos traços “CRF” e “25F”, indicando o pouco ou quase nenhum efeito da solução no concreto, como já dito anteriormente, o aumento do módulo é esperado com o aumento da idade, considerando que os módulos foram averiguados aos 28 dias no traço de referência e aos 180 dias nos imersos.

Apenas “50F” obteve redução no módulo, indicando maior deterioração deste parâmetro no concreto, essa com valores semelhantes ao observado na solução de 10% de sulfato de sódio.

Com relação a compressão foram observados reduções para todos os traços, isto é, esta solução ocasionou de fato a deterioração do concreto, com o maior efeito no traço de referência, podendo a presença da limalha de aço atenuar este efeito nas devidas proporções. Os valores amostrais estão contidos na Figura 4.101.

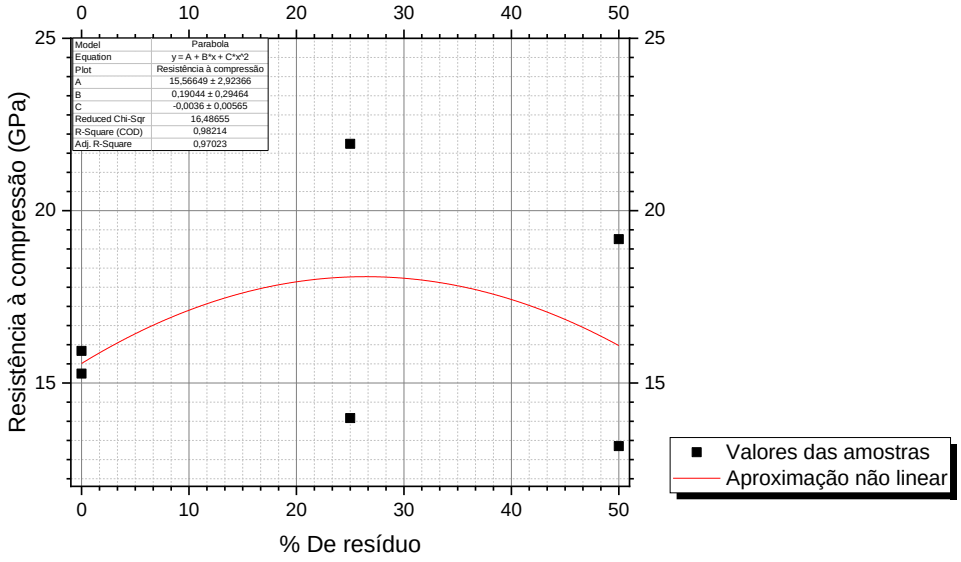
Figura 4.101 – Comparação entre os traços de referência e atacados (substituição de fibras de aço) – Resistência a compressão



Fonte: Autor (2023)

A aproximação não linear da resistência por teor de incorporação dos corpos de prova atacados está representado na Figura 4.102, possuindo fator R^2 de 0,98214.

Figura 4.102 – Resistência à compressão por teor de incorporação (substituição de fibras de aço) – Solução de 10% de sulfato de sódio.



Fonte: Autor (2023)

Sendo obtido novamente o melhor teor de substituição em torno de 20%, com relação a compressão a presença da limalha não ocasionou aumento da deterioração do concreto imerso em solução agressiva de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio.

- CRF (0%): Aumento no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco ou nenhum efeito da solução neste parâmetro; maior diminuição da resistência à compressão;
- 25F (25%): Aumento no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando pouco ou nenhum efeito da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão, com variação menor que a obtida no traço de referência;
- 50F (50%): Diminuição no módulo de elasticidade dinâmico com a idade, implicando efeito da solução neste parâmetro; diminuição da resistência à compressão, com variação menor que a obtida no traço de referência;

4.4.3.7.4 Considerações gerais a respeito dos resultados do ensaio de imersão

A resistência a compressão foi reduzida para todas os teores e soluções, porém essa redução não está atrelada a presença de limalha de aço, que atenuou o efeito da redução em alguns casos, enquanto o traço de referências só não obteve o maior decréscimo na solução de 5% de sulfato de sódio, mesmo assim próximo a redução máxima obtida nesta solução.

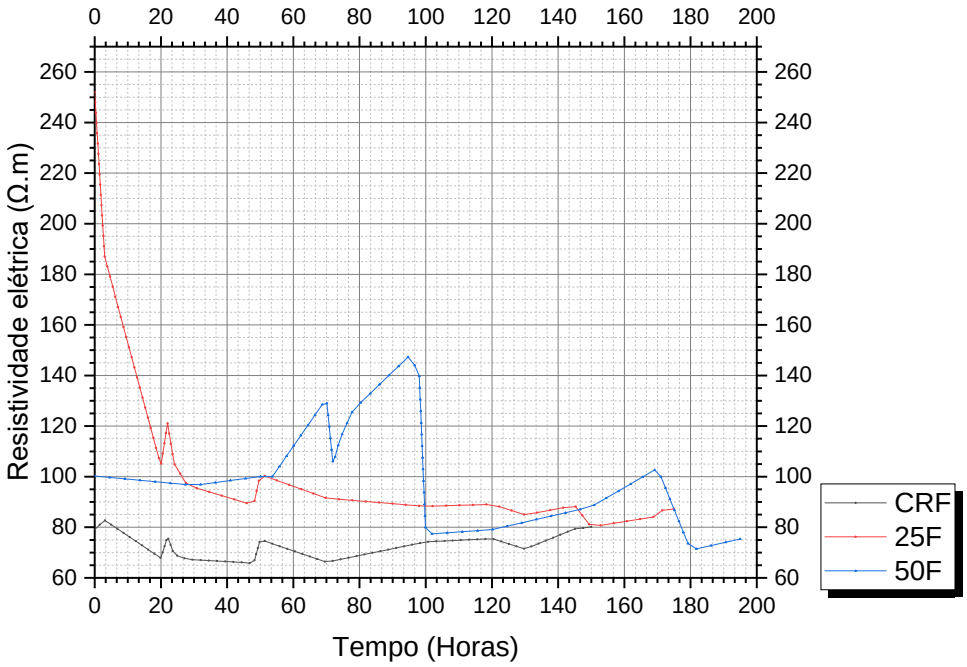
Com relação ao módulo este sofreu influência da presença de limalha de aço em dois casos específicos, da solução de 10% de sulfato de sódio e teor de 25% e solução de 5% de sulfato de sódio e 3% de cloreto de sódio com teor de 50%, porém nas demais situações a limalha de aço se comportou melhor ou semelhante ao traço de referência.

Não é possível afirmar que a limalha de aço aumenta a deterioração do concreto, ela prejudicou em casos específicos, porém também auxiliou em outras situações.

4.4.3.8 Resistividade elétrica

Ao contrário das substituições de agregado miúdo e graúdo, foi possível a averiguação da resistividade elétrica com o tempo no traço de referência, os valores obtidos estão contidos na Figura 4.103 abaixo.

Figura 4.103 – Resistividade elétrica por tempo – Substituições de fibras de aço



Fonte: Autor (2023)

No geral os valores possuíram tendência semelhante, com a estabilização próxima de 80 ohm.metro, assim sendo, a presença de limalha de aço não influenciou a resistividade elétrica do concreto de maneira significativa, com o efeito mais expressivo sendo a variabilidade maior deste parâmetro com o tempo antes da estabilização, fator este, esperado dado a falta de padronização da geometria da limalha de aço se comparado as fibras de aço convencionais.

4.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS DOS RESULTADOS OBTIDOS

Na Tabela 4.51 estão contidas, de forma resumida, as principais considerações e discussões acerca dos resultados obtidos neste trabalho.

Tabela 4.51 – Resumo dos resultados obtidos

Substituição	Discussão geral dos resultados obtidos
Agregado miúdo	A substituição do agregado miúdo por limalha de aço resultou em uma melhoria na qualidade do concreto produzido, evidenciada por reduções significativas na porosidade e absorção de água, juntamente com o aumento nas propriedades mecânicas, sendo observado um incremento de aproximadamente 70% nas resistências à tração e compressão. Quanto à durabilidade do concreto, avaliações por meio de ensaios de imersão e resistividade elétrica não indicaram que a inclusão de limalha de aço promova a deterioração ao longo do tempo. Em alguns casos, observou-se que o resíduo atenuou os efeitos de degradação do concreto. Os melhores resultados foram obtidos em teores próximos de 10% de substituição de agregado miúdo em relação ao peso de cimento.
Agregado graúdo	A substituição de agregado graúdo por limalha de aço ocasionou reduções significativas na porosidade e absorção de água, com relação as propriedades mecânicas, o traço de 5% obteve resultados próximos ao concreto de referência, houve aumento considerável na resistência à tração em teores superiores a 10% e a compressão para teores superiores a 13%, porém, sendo observado que para teores superiores aos estudados, existe a tendência de melhoras significativas das propriedades mecânicas do concreto. Com relação a durabilidade do concreto, através dos ensiaos de imersão foi constatado uma sensibilidade maior nos traços contendo até 10% de incorporação, porém teores superiores tendem a retardar o efeito da degradação do concreto imerso em soluções salinas, quanto a resistividade elétrica não foi constado que a inserção de limalha de aço aumente a deterioração do concreto com o tempo.
Fibras de aço	A substituição de fibras de aço pelos resíduos de usinagem resultou em variações modestas nas propriedades do concreto em comparação com as outras duas substituições realizadas. De maneira geral, para as resistências mecânicas, a proporção de 25% tende a melhorar principalmente a compressão do concreto, enquanto a substituição de 50% apresenta valores em relação a referência inferior para a tração e próximo para compressão, os resultados demonstram que o resíduo tende a atuar como agregado no concreto. O módulo de elasticidade experimentou um leve incremento com as substituições. No que diz respeito à durabilidade do concreto, avaliações por meio de ensaios de imersão e resistividade elétrica não indicaram que a inserção dos resíduos de usinagem aumente a deterioração do concreto ao longo do tempo. Em alguns casos, observou-se que o resíduo atenue os efeitos de degradação do concreto. É possível afirmar que esta substituição se mostrou positiva, uma vez que, mesmo com pouca variação nas propriedades, ainda sim está sendo realizada a substituição de um material proveniente de recursos naturais e com valor comercial, por um subproduto do processo de usinagem.

Fonte: Autor (2023)

5 CONCLUSÕES

A inserção de limalha de aço no concreto apresentou resultados interessantes no geral, com as características mais positivas obtidas na substituição de agregado miúdo, em que, teores de substituições próximos a 10%, com aumentos na ordem de 70% das resistências à tração e compressão, não apenas as propriedades mecânicas foram melhoradas mas também a qualidade geral do concreto produzido, conforme averiguado em correlações de propriedades realizadas.

No caso dessa substituição, a limalha de aço atuou como um agregado com pequenas características de fibra, visto o aumento da tenacidade obtido pela curva tensão por deformação específica do concreto, e ao contrário do esperado, mesmo se tratando de um material metálico não foi possível verificar aumento de degradação do concreto, que foi analisada por duas metodologias diferentes (imersão e resistividade elétrica), dessa forma, é possível afirmar que, a substituição de agregado miúdo (com proporção próxima de 10% do peso do cimento) por limalha de aço é viável, sendo interessante a verificação através de simulações e análises numéricas de aplicabilidade prática destes concretos em estruturas de tamanhos e formas diferentes, sujeitas a diferentes tipos de carregamentos e situações.

Para a substituição de agregado graúdo, os resultados não se mostraram tão positivos quanto o caso anterior, pelo menos dentro da faixa de estudo realizada, uma vez que, para a maior parte das propriedades averiguadas é notado a tendência de melhora de maneira expressiva para teores superiores a 15%, ainda sim, mesmo para os teores de 10% e inferiores algumas características do concreto foram melhoradas, tais como sua qualidade e pequenos aumentos nos módulos de elasticidade e resistência à tração.

Porém estes traços com incorporação de 10% e inferiores se mostraram mais sensíveis em alguns casos de degradação, o que pode ser um fator determinante para a sua devida aplicabilidade, salientando que, traços com teor de 15% aumentaram a durabilidade do concreto, atenuando o efeito agressivo das soluções estudadas, reforçando assim que, os melhores teores de substituição de brita por limalha de aço provavelmente são superiores aos estudados e podem apresentar resultados semelhantes ou até mesmo superiores aos vistos nos traços de substituições de agregado miúdos.

Para a substituição de fibras por limalha de aço no geral, alguns resultados foram positivos como aumento da resistência à compressão, mas ainda assim ocorreram variações (tanto positivas como negativas) pouco expressivas em outras propriedades, o que não significa necessariamente resultados negativos, uma vez que, mesmo os traços com incorporação se comportando de maneira semelhante, vale lembrar que estes possuem resíduos, materiais estes

que não possuem aplicabilidade nenhuma após sua geração. Foi visto que para estes traços a limalha de aço se comportou essencialmente como agregado, e melhorou a qualidade geral destes no concreto, tal comportamento está atrelado principalmente a geometria utilizada. A substituição de fibras por resíduos de usinagem pode ser mais interessante utilizando limalhas de aço com outras geometrias ou até mesmo com mistura destas, podendo ocasionar não só melhoras expressivas nos concretos produzidos como também a atuação de fato do resíduo como material fibroso no concreto.

Mesmo que os aspectos positivos da limalha de aço nos traços de substituições de fibras de aço e de agregado graúdo tenham sido no geral menos expressivas do que as vistas nas de agregado miúdo, vale ressaltar que, ainda sim nestes traços os materiais estão sendo substituídos por um resíduo sólido, com propriedades que foram melhoradas ou pouco alteradas, do ponto de vista ambiental os resultados são satisfatórios para todos os casos de substituições.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao fim, três principais sugestões são realizadas para pesquisas e trabalhos futuros envolvendo este assunto e que possam se basear nesta dissertação, cada uma destas relacionada a um tipo de substituição.

- 1. Agregados miúdos: Análise do material através de simulações numéricas, a fim de entender melhor o comportamento prático de diferentes tipos de estruturas confeccionadas com o mesmo, frente as mais diversas situações.
- 2. Agregados graúdos: Estudo em teores superiores aos de 14% de substituição em relação ao peso de cimento.
- 3. Fibras metálicas: Utilização de geometrias diferentes de resíduos, tais como, os tipos “2.1”, “2.2”, “4.1”, “4.2”, “5.1” e “5.2” da ISO 3685:2017 (Figura 2.9).

Também se mostram interessantes pesquisas utilizando o material como adição ao concreto, essa podendo ser realizada em relação ao volume de concreto produzido e com tipo fixo de resíduo ou mistura entre diferentes geometrias, não apenas em concretos convencionais mas também nos de ultra-alto desempenho, podendo otimizar ainda mais este material, seja em suas propriedades mecânicas como sua qualidade geral.

6 REFERÊNCIAS

ACI Committee 201. 1982**. Guide to Durable Concrete (ACI PRC-201.2-16 82)**. 2008.

ACI Comite 544. (2002). **State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete Reported** (ACI 544.1R-96 Reapproved 2002). ACI Structural Journal, 1996 (Reapproved).

ALONSO; C.; ANDRADE, C. CASTELLOTE, M. CASTRO; P. **Valores Críticos de Cloruros pada Despassivar Aceros de Refuerzo Embebidos en un Mortero Estandarizado de Cemento Portlan.** IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. Anais, v.2, 1997. P. 555-562.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four electrode method.** G 57:95a (reapproved 2001). Annual Book of ASTM Standard, v. 3.2., p. 225-229, 2002.

ANDRADE, C**. Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcement by using the electrical resistivity.** In. International symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, RILEM. Proceedings Evanston: 2004. p. 1-8

ANDRADE, J.; J.; O. **CONTRIBUIÇÃO À PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO ATACADAS PELA CORROSÃO DE ARMADURAS: INICIAÇÃO POR CLORETOS.** *Tese* (Doutorado em engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5722: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndrico**s. Rio de Janeiro: ABNT 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 1: Módulos estáticos à compressão,** Rio de Janeiro: ABNT 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522-2: Concreto Endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração**. Rio de Janeiro: ABNT 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802: Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação ultrassônica**. Rio de Janeiro: AB NT 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro: ABNT 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778: Argamassas e Concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11172: Aglomerantes de origem minera**l . Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento** . Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: ABNT 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16940**: **Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972**: **Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT 2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 3685: Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento**. Rio de Janeiro: ABNT 2017.

ASTM - American Society for Testing Materials. **ASTM C 125 – Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.** 2021.

ASTM - American Society for Testing Materials. **ASTM C 150 – Standard Specification for Portland Cement.** 2021.

ASTM - American Society for Testing Materials. **ASTM C 597 – Standard Test Method for Ultrassonic Pulse Velocity Through Concrete.** 2016.

ASTM - American Society for Testing Materials. **ASTM G 57 – Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Eletrode Method.** 1990.

AZARSA, P.; GUPTA, R**. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. Hidawi – Avances in Material Science And Engineering**. Volume 2017. 31 de maio de 2017.

AZEVEDO, F. F. DE et al. **AGREGADOS MIÚDOS : A Importância dos Agregados Miúdos no Controle Tecnológico do Concreto**. Revista Conexão Eletrônica, v. 14, n. 2014, p. 2079– 2086, 2017

BATTAGIN, A. F**. Concreto: Ciência e Tecnologia**.1 . ed. São Paulo, IBRACON, 2011.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos;** altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BUTTLER, A. M. **CONCRETO COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO – INFLUÊNCIA DA IDADE DE RECICLAGEM NAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS E CONCRETOS RECICLADOS**. 2003. 220f. Mestrado (Mestre em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CAMARGO, M. V. DE. **Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END**). 2020. 143f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020

CAMPITELI, V. C. **Porosidade do Concreto.** São Paulo Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1987.

CASARIN; S. J. **Manufatura Mecânica: Usinagem.** Editora e Distribuidora Educacional S.A., 1° ed. Londrina-PR. 2018

COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACION. **NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. 2001.

COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACION. **NM 52: Agregado Miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente**. 2009.

COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACION. **NM 53: Agregado Graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. 2009.

COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACION. **NM 8: Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. 1994.

DANDOLINI, D. L**. Gerenciamento ambiental de fluidos de corte em indústrias metal-mecânicas**. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em *ENGENHARIA AMBIENTAL, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001*

DIOGENES, H. J. F. et al **. Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica**. Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo , v. 4, n. 5, p. 803-813, Dec. 2011.

DIPROTEC. **Produtos técnicos para construção**. Disponível em: < https://www.diprotec.com.br/produto/aglomerantes/>. Acesso em agosto de 2023

DYER, T. **Concrete Durability**. 1a Edição. Boca Raton: CRC Press, 2014. 420 f.

FERREIRA, A., R., L.; LIMA, F., M., DA R., DE S. **Impactos ambientais e econômicos dos agregados naturais e reciclados na construção civil**. Cetem, p. 1–5, 2013.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço.** 2000.Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Civil. São Paulo-SP. 2000.

FILHO,S. L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito de permeação de água e da adição de microssílica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

HOSEN, A.; ALTHOEY F. **Physical and Mechanical Characteristics of Sustainable Concrete Comprising Industrial Waste Materials as a Replacement of Conventional Aggregate.** Sustainability. 2021.

HUNKELER, F**. The resistivity of pore water solution-a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods.** Construction and Building Materials, v. 10, n. 5, p. 381-389, 1996.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **A Siderurgia em Números 2022.** Rio de Janeiro, maio de 2022.

ISAIA, G.C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** IBRACON. 2010.

JASSIM, A. K. **Sustainable Solid Waste Recycling.** Skills Development for Sustainable Manufacturing. 2017.

JESUS, L. S. **A Resistividade Elétrica do Concreto e a sua Correlação com a Durabilidade das Estruturas.** Engenharia estudo e Pesquisa. ABPE. 18 -n. 1 – p. 26-33 – jan/jun. 2018.

JSTMC 7401. **Method of Test for Chemical Resistance of Concrete in Aggressive Solution**. Japanese Industrial Standard: Tokyo, Japan, 1999.

KAVALIAUSKIENE, L.; BENDIKIENE, R.; CIUPLYS, A. **Circular economy practice: From industrial metal waste to production of high wear resistant coatings**. Journal of Cleaner Production vol. 229. 2019.

KESSHAVARZ, Z.; MOSTOFINEJAD, D. **Steel chip and porcelain ceramic wastes used as replacements for coarse aggreegates in concrete**. Journal os Cleaner Production vol. 230. 2019.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria Da Usinagem Dos Materiais**. 1. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

MALEK, M.; KADELA, M.; TERPILOWSKI, M.; SZEWCZYK, T.; LASICA, W.; MUZOLF, P. **Effect of Metal Lathe Waste Addition on the Mechanical and Thermal Properties of Concrete.** MATERIALS. 2021.

MAANVIT, P. S.; PRASAD, B. P.; VARDHAN, M. H.; JAGARAPU, D. C. K.; ELURU, A. **Experimental Examination of Fiber Reinforced Concrete Incorporation with Lathe Steel Scrap.** International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. Volume 9, dezembro de 2019.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo-SP: IBRACON 2014.

MILLA, J. et al. **Methods of Test for Concrete Permeability: A Critical Review**. Advances in Civil Engineering Materials. v. 10, no 1, 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5a edição ed. [s.l.] Editora Bookman, 2016.

PACHECO, J. et al. **Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto**. IBRACON, 2014.

POSSAN, E.; ALVEZ, H.;HELENE, P. **Módulo de elasticidade dinâmico do concreto: por que utilizar.** 62° Congresso Brasileiro do concreto. 2020.

PRABU, M.; VIGNESH, K.; PRASANNA, N. S.; PRAVEEN, C.; NAFEEZ, A. M. **Experimental study on concrete in partial replacement of fine aggregate with lathe waste.** International Journal of Scientific and Engineering Research. Volume 11. Março de 2020.

SENGUL, O. **Use of electrical resistivity as an indicator for durability**. Construction and Building Materials, vol. 73, pp. 434–441, 2014.

SHEIKH, M. A.; REZA, M. **STRENGTHENING OF CONCRETE USING LATHE SCRAP WASTE.** International Research Journal of Engineering and Technology. Volume 7. Outubro de 2020.

SHEWALUL, Y. W. **Experimental study of the effect of waste steel scrap as reinforcing material on the mechanical properties of concrete.** Case Studies in Construction Materials. Volume 14. Junho de 2021.

PRASAD, B. P.; MAANVIT, P. S.; JAGARAPU, D. C. K.; ELURU, A. **Flexural behavior of fiber reinforced concrete incorporation with lathe steel.** Materialstoday: Proceedings. Volume 33, parte 1, 2020.

PUROHIT, R.; DULAWAT, S.; AHMAD, E. **TO ENHANCE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE BY USING LATHE STEEL SCRAP AS REINFORCED MATERIAL.** Journal of Engineering Science. Volume 11. Junho de 2020

SINGH, H. **Steel fiber reinforced concrete: behavior, modelling and design**. Springer, 2017.

SOBRAL, H. S**. Propriedades do concreto fresco**. 6a Edição ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000.

RAI, A.; JOSHI, Y. P. **Applications and Properties of Fiber Reinforced Concrete**. Journal of Engineering. Research and Applications, Vol 4. maio de 2014.

RAJABIPOUR, F.; WEISS, J.; ABRAHAM D. M. **Insitu electrical conductivity measurements to assess moisture and ionic transport in concrete (A discussion of critical features that influence the measurements).** Proceedings of the International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur, 2004.

RODRIGUES, F. **DIAGNÓSTICO AMBIENTAL EM UMA INDÚSTRIA METALÚRGICA DE IMBITUVA – PR.** Trabalho de Conclusão de Curso em Bacharelado em Engenharia Mecânica. UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná). Guarapuava-PR. 2018.

ROTTA, J. V. P. **AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO EM CONCRETOS ESTRUTURAIS BASEADA NA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E NO ATAQUE DE SOLUÇÕES AGRESSIVAS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2022.

VALIN JR, M. DE O. et al. **Aplicação de Ensaios Não Destrutivos de Concreto Para Avaliação Estrutural da Fundação de Torre de Linha de Transmissão**. E&S Engineering and Science, v. 6, n. 2, p. 46–59, 2017

World Steel Association. **Global Crude Steel Output.** 2020. Disponível em: <https://www.worldsteel.org/media-centre/pressreleases/2020/Global-crude-steel-output-increases-by-3.4--in-2019.html>. Acesso em 20/09/2022.

ZHAO, G.; LI, J.; SHAO, W. **Effect os mixed chlorides on the degradation and sulface diffusion of cast-in-situ concrete due to sulfate attack.** Construction and Building MATERIALS. 28 de maios de 2018.

ZHAO, G.; LI, J.; SHI, M.; CUI, J.; XIE, F. **Degradation os cast-in-situ concrete subject to sulphate-chloride combined attack.** Construction and Building MATERIALS. 8 de dezembro de 2020.

ZHAO, G.; LI, J.; SHI, M.; CUI, J.; XIE, F. **Degradation mechanisms of cast-in-situ concrete subjected to internal-external combined sulfate attack.** Construction and Building MATERIALS. 5 de março de 2020.

ÇELIC, A. I.; OZKILIÇ, Y.O.; ZEYBEK, O.; OZDONER, N.; TAYEH, B.A. **Perfomance Assessment Fiber-Reinforced Concrete Product with Waste Lathe Fibers**. Sustainability. 20 de setembro de 2022.

APÊNDICE A- Valores obtidos nas medições de cada traço

	REF					
	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
Absorção de água (%)	8,33%	8,33%	8,57%	10,00%	8,57%	10,14%
Índice de vazios (%)	19,19%	19,49%	20,20%	22,73%	20,00%	22,88%
Massa específica seca (Kg/m³)	2303,26	2339,18	2356,90	2272,73	2333,33	2254,90
Massa específica saturada (Kg/m³)	2495,20	2534,11	2558,92	2500,00	2533,33	2483,66
Massa específica real (Kg/m³)	2850,36	2905,57	2953,59	2941,18	2916,67	2923,73
Resistência à compressão -28 dias (MPa)	17,96	19,54	23,84	16,75	20,39	21,41
Resistência à compressão -91 dias (MPa)	21,12	19,97	27,59	30,05	25,48	30,89
Resistência à compressão -180 dias (MPa)	29,71	26,61	-	-	-	-
Resistência à tração indireta (MPa)	3,14	3,13	2,07	4,09	2,53	2,85
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom (Gpa)	45,82	44,83	44,44	43,65	44,83	43,07
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic* (Gpa)	37,24	34,65	35,94	-	-	-
Módulo de elasticidade estático (Gpa)	-	24,30	36,09	27,85	26,69	-

	5A					
	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
Absorção de água (%)	6,94%	6,94%	7,14%	6,94%	8,33%	6,94%
Índice de vazios (%)	17,47%	17,34%	17,53%	17,42%	20,76%	17,48%
Massa específica seca (Kg/m³)	2515,72	2496,53	2454,42	2508,71	2491,35	2517,48
Massa específica saturada (Kg/m³)	2690,43	2669,90	2629,73	2682,93	2698,96	2692,31
Massa específica real (Kg/m³)	3048,26	3020,13	2976,19	3037,97	3144,10	3050,85

Resistência à compressão -28 dias (MPa)	16,33	21,80	20,27	24,22	24,22	25,93
Resistência à compressão -91 dias (MPa)	243,36	217,27	188,58	230,27	188,75	196,02
Resistência à compressão -180 dias (MPa)	34,18	25,93	30,05	-	-	-
Resistência à tração indireta (MPa)	3,68	3,33	3,98	4,72	5,48	4,41
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom (Gpa)	45,86	46,06	51,45	45,46	46,67	45,86
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic* (Gpa)	39,91	40,16	40,03	-	-	-
Módulo de elasticidade estático (Gpa)	28,40	-	19,91	24,36	23,78	23,32

10A

	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
Absorção de água (%)	5,56%	5,48%	5,41%	5,63%	5,56%	5,48%
Índice de vazios (%)	13,56%	13,70%	13,61%	14,18%	13,89%	13,89%
Massa específica seca (Kg/m³)	2440,68	2500,00	2517,01	2517,73	2500,00	2534,72
Massa específica saturada (Kg/m³)	2576,27	2636,99	2653,06	2659,57	2638,89	2673,61
Massa específica real (Kg/m³)	2823,53	2896,83	2913,39	2933,88	2903,23	2943,55
Resistência à compressão -28 dias (MPa)	38,53	30,81	35,13	35,15	32,44	36,20
Resistência à compressão -91 dias (MPa)	37,34	35,24	28,39	31,32	30,43	28,90
Resistência à compressão -180 dias (MPa)	32,17	31,76	31,97	-	-	-
Resistência à tração indireta (MPa)	4,11	6,41	4,58	4,41	7,47	3,94
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom (Gpa)	50,10	50,10	54,63	46,38	49,47	48,02

Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic* (Gpa)	41,94	39,28	40,61	-	-	-
Módulo de elasticidade estático (Gpa)	23,74	25,84	31,23	17,17	24,30	21,72

	15A					
	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
Absorção de água (%)	6,94%	5,41%	5,56%	5,41%	6,94%	6,94%
Índice de vazios (%)	17,36%	13,42%	14,49%	13,79%	17,12%	17,36%
Massa específica seca (Kg/m³)	2500,00	2483,22	2608,70	2551,72	2465,75	2500,00
Massa específica saturada (Kg/m³)	2673,61	2617,45	2753,62	2689,66	2636,99	2673,61
Massa específica real (Kg/m³)	3025,21	2868,22	3050,85	2960,00	2975,21	3025,21
Resistência à compressão -28 dias (MPa)	19,61	25,01	25,94	20,97	24,42	26,81
Resistência à compressão -91 dias (MPa)	26,61	30,21	22,41	20,49	15,07	21,65
Resistência à compressão -180 dias (MPa)	27,46	26,81	27,14			
Resistência à tração indireta (MPa)	3,55	4,76	3,17	4,16	2,88	2,77
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom (Gpa)	44,55	45,54	47,37	46,55	45,54	46,15
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic* (Gpa)	38,79	41,29	40,04			
Módulo de elasticidade estático (Gpa)	26,94	27,04	26,48	13,69	19,10	23,95

	5B					
	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
Absorção de água (%)	8,45%	8,45%	8,45%	5,56%	8,45%	9,86%
Índice de vazios (%)	20,41%	20,98%	20,83%	14,08%	20,41%	23,97%
Massa específica seca (Kg/m³)	2414,97	2482,52	2465,28	2535,21	2414,97	2431,51
Massa específica saturada (Kg/m³)	2619,05	2692,31	2673,61	2676,06	2619,05	2671,23

Massa específica real (Kg/m³)	3034,19	3141,59	3114,04	2950,82	3034,19	3198,20
Resistência à compressão -28 dias (MPa)	22,97	17,39	19,23	19,54	21,89	15,15
Resistência à compressão -91 dias (MPa)	21,11	23,87	27,47	24,73	22,10	20,74
Resistência à compressão -180 dias (MPa)	23,44	24,17	23,81	-	-	-
Resistência à tração indireta (MPa)	2,94	4,23	2,53	2,64	2,51	2,80
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom (Gpa)	46,88	46,47	45,67	44,87	45,27	44,87
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic* (Gpa)	35,84	39,92	37,88	-	-	-
Módulo de elasticidade estático (Gpa)	-	-	40,60	24,40	30,52	-

10B

	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
Absorção de água (%)	7,04%	7,04%	6,94%	7,04%	6,94%	7,14%
Índice de vazios (%)	18,25%	18,80%	17,99%	18,12%	17,99%	18,12%
Massa específica seca (Kg/m³)	2591,24	2669,17	2589,93	2572,46	2589,93	2536,23
Massa específica saturada (Kg/m³)	2773,72	2857,14	2769,78	2753,62	2769,78	2717,39
Massa específica real (Kg/m³)	3169,64	3287,04	3157,89	3141,59	3157,89	3097,35
Resistência à compressão -28 dias (MPa)	19,30	14,82	17,99	16,35	15,39	19,30
Resistência à compressão -91 dias (MPa)	21,07	25,25	24,29	28,90	18,87	21,07
Resistência à compressão -180 dias (MPa)	27,45	27,61	27,53	-	-	-
Resistência à tração indireta (MPa)	3,32	3,67	2,86	3,37	3,77	4,69
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom (Gpa)	45,26	43,87	44,66	44,47	47,28	44,47

Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic* (Gpa)	36,91	38,48	37,69	-	-	-
Módulo de elasticidade estático (Gpa)	29,11	48,56	-	33,08	41,45	19,76

15B

	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
Absorção de água (%)	6,94%	6,85%	7,04%	6,94%	7,04%	6,94%
Índice de vazios (%)	19,38%	19,08%	19,38%	18,52%	18,94%	18,52%
Massa específica seca (Kg/m³)	2790,70	2786,26	2751,94	2666,67	2689,39	2666,67
Massa específica saturada (Kg/m³)	2984,50	2977,10	2945,74	2851,85	2878,79	2851,85
Massa específica real (Kg/m³)	3461,54	3443,40	3413,46	3272,73	3317,76	3272,73
Resistência à compressão -28 dias (MPa)	21,89	22,91	20,96	23,94	26,61	19,05
Resistência à compressão -91 dias (MPa)	21,94	30,43	28,31	22,39	26,09	28,68
Resistência à compressão -180 dias (MPa)	28,14	28,39	28,27	-	-	-
Resistência à tração indireta (MPa)	4,21	3,56	3,69	3,90	4,11	2,51
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom (Gpa)	45,65	46,05	45,85	46,05	44,44	44,05
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic* (Gpa)	38,66	39,06	38,86	-	-	-
Módulo de elasticidade estático (Gpa)	35,63	35,66	-	-	35,66	43,72

CRF

	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
Absorção de água (%)	6,94%	6,94%	6,85%	9,86%	4,11%	8,57%
Índice de vazios (%)	18,25%	17,73%	17,86%	23,97%	11,63%	21,74%
Massa específica seca (Kg/m³)	2627,74	2553,19	2607,14	2431,51	2829,46	2536,23
Massa específica saturada (Kg/m³)	2810,22	2730,50	2785,71	2671,23	2945,74	2753,62

Massa específica real (Kg/m³)	3214,29	3103,45	3173,91	3198,20	3201,75	3240,74
Resistência à compressão -28 dias (MPa)	22,78	18,93	18,40	18,32	15,57	16,18
Resistência à compressão -91 dias (MPa)	23,39	25,79	23,77	24,50	31,59	24,83
Resistência à compressão -180 dias (MPa)	23,72	28,42	26,07	-	-	-
Resistência à tração indireta (MPa)	4,13	4,85	3,43	4,35	3,78	4,11
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom (Gpa)	41,70	41,32	43,45	39,99	42,67	39,99
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic* (Gpa)	36,23	37,49	36,86	-	-	-

25F

	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
Absorção de água (%)	4,00%	9,59%	8,33%	5,48%	5,63%	10,00%
Índice de vazios (%)	11,45%	23,65%	21,43%	15,27%	16,00%	24,31%
Massa específica seca (Kg/m³)	2862,60	2466,22	2571,43	2786,26	2840,00	2430,56
Massa específica saturada (Kg/m³)	2977,10	2702,70	2785,71	2938,93	3000,00	2673,61
Massa específica real (Kg/m³)	3232,76	3230,09	3272,73	3288,29	3380,95	3211,01
Resistência à compressão -28 dias (MPa)	22,51	19,07	18,94	23,05	17,96	18,95
Resistência à compressão -91 dias (MPa)	29,06	31,51	29,37	26,73	29,19	27,81
Resistência à compressão -180 dias (MPa)	25,82	22,48	24,15	-	-	-
Resistência à tração indireta (MPa)	3,95	4,54	4,96	3,90	3,81	4,42
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom (Gpa)	42,19	42,77	44,14	43,35	41,42	43,75
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic* (Gpa)	34,02	36,78	35,40	-	-	-

	50F					
	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
Absorção de água (%)	11,43%	9,59%	8,33%	5,48%	4,17%	11,59%
Índice de vazios (%)	30,53%	23,65%	21,43%	15,27%	12,00%	27,78%
Massa específica seca (Kg/m³)	2671,76	2466,22	2571,43	2786,26	2880,00	2395,83
Massa específica saturada (Kg/m³)	2977,10	2702,70	2785,71	2938,93	3000,00	2650,00
Massa específica real (Kg/m³)	3846,15	3230,09	3272,73	3288,29	3272,73	3317,31
Resistência à compressão -28 dias (MPa)	-	19,53	19,03	20,26	19,36	20,93
Resistência à compressão -91 dias (MPa)	3,44	3,52	3,71	3,39	3,57	3,56
Resistência à compressão -180 dias (MPa)	25,89	20,11	23,00	-	-	-
Resistência à tração indireta (MPa)	-	28,97	21,89	21,18	28,91	27,85
Módulo de elasticidade dinâmico - Ultrassom (Gpa)	45,21	44,61	44,42	45,21	44,02	43,04
Módulo de elasticidade dinâmico - *Sonelastic* (Gpa)	37,75	36,16	36,95	-	-	-