

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após a abordagem da realização de todos os procedimentos de ensaio, neste capítulo serão relatados os resultados obtidos, com a devida análise. Para uma melhor apresentação dos resultados, os corpos de prova de diferentes resistências foram classificados em séries. Desta forma, os corpos de prova dosados para resistências à compressão de 80 MPa, os de 100 MPa, os 40 MPa – primeira tentativa – e os de 40 MPa – 2ª tentativa - foram denominados série 80, série 100, série 40-1, série 40-2 , respectivamente.

5.1 Resistência à compressão axial

Os resultados obtidos para o ensaio de compressão axial para os 12 corpos de prova de cada série estão apresentados na tabela 5.1, sendo a carga de ruptura expressa em kN e a tensão de ruptura em MPa.

A partir da obtenção das cargas de ruptura, foram calculadas: a tensão média de ruptura f_c , desvio padrão, tensão característica f_{ck} conforme a norma brasileira, tensão característica f_c' conforme as recomendações do ACI. Estas últimas são apresentadas nesta dissertação para efeito de ilustração da diferença conceitual que tais valores representam.

No entanto, para efeito de estudo das relações entre resistência à compressão e outras propriedades relatadas nesta dissertação, são utilizados os valores de resistência média, para uma melhor comparação das fórmulas propostas com os dados experimentais obtidos.

Tabela 5.1 - Valores de cargas e tensões obtidos nos ensaios de compressão axial.

| AMOSTRA | SÉRIE 40-1(60) | | SÉRIE 40-2 | | SÉRIE 80 | | SÉRIE 100 | |
|---------|----------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| | Carga (kN) | Tensão (MPa) | Carga (kN) | Tensão (MPa) | Carga (kN) | Tensão (MPa) | Carga (kN) | Tensão (MPa) |
| 01 | 533 | 67.86 | 445 | 56.66 | 592 | 75.38 | 662 | 84.29 |
| 02 | 484 | 61.63 | 380 | 48.38 | 645 | 82.12 | 770 | 98.04 |
| 03 | 540 | 68.76 | 443 | 56.41 | 615 | 78.31 | 702 | 89.38 |
| 04 | 522 | 66.46 | 470 | 59.84 | 631 | 80.34 | 698 | 88.87 |
| 05 | 434 | 55.26 | 425 | 54.11 | 622 | 79.20 | 741 | 94.35 |
| 06 | 555 | 70.67 | 456 | 58.06 | 563 | 71.68 | 760 | 96.77 |
| 07 | 520 | 66.21 | 438 | 55.77 | 587 | 74.74 | 758 | 96.51 |
| 08 | 511 | 65.06 | 440 | 56.02 | 610 | 77.67 | 736 | 93.71 |
| 09 | 526 | 66.97 | 435 | 55.39 | 600 | 76.40 | 666 | 84.80 |
| 10 | 535 | 68.12 | 423 | 53.86 | 599 | 76.27 | 785 | 99.95 |
| 11 | 520 | 66.21 | 450 | 57.30 | 585 | 74.49 | 734 | 93.46 |
| 12 | 456 | 58.06 | 442 | 56.28 | 616 | 78.43 | 625 | 79.58 |

A tabela 5.2 oferece uma melhor visualização dos resultados finais para que possa ser elaborada uma análise do método de dosagem.

Analisando os resultados, percebe-se que o método de dosagem se mostrou eficiente para a série 80, com uma variação, entre média dos valores de resistência obtidas e da desejada, equivalente a 3.65%.

Para a série 100, constatou-se pela característica da ruptura dos corpos de prova que o agregado graúdo havia chegado a seu limite, pois todas as peças romperam partindo o agregado. Mesmo assim, foi constatada uma variação entre média dos valores de resistência obtidas e do desejado, equivalente a 8.38%. Desta forma, foi considerada satisfatória uma vez que os agregados utilizados estavam em seu limite.

Para a série 40-1, que foi a primeira tentativa relatada nos procedimentos de ensaio para obtenção de 40 MPa, obteve-se uma resistência muito acima do esperado, com uma média de 65.11MPa, apresentando uma variação média de 62.77%, acima do valor esperado, que era 40MPa. Como o objetivo deste trabalho

contemplava também o estudo de propriedades do concreto com 60MPa, os corpos de prova já elaborados foram utilizados para este fim. A partir de então, esta série passa a ser chamada de série 60, para ficar relacionada ao valor de sua resistência.

Para a série 40-2, quando foi realizada a segunda tentativa para obtenção de resistência de 40 MPa, aumentando-se o fator água/ material cimentício para o fator limite adotado para os concretos de alto desempenho, foi obtida uma variação de 39.17%. No caso desta série de corpos de prova, houve necessidade de antecipar-se a data dos ensaios por motivos de compatibilidade entre disponibilidade da agenda e prazo de conclusão deste trabalho. Assim sendo, os corpos de prova desta série foram rompidos aos 15 dias, apresentando uma resistência média de 55.67 MPa. Extrapolando-se este valor para os 28 dias será obtida uma resistência média superior a 60 MPa. Desta forma, como já haviam corpos de prova disponíveis para valores com esta faixa de resistência, optou-se em não utilizá-los para os ensaios de módulo de elasticidade e de porosidade. Resistência à tração, cuja contribuição com mais dados para idade mais recente entre as duas resistências poderia ser relevante, foi ensaiada da mesma forma que as outras séries.

Tabela 5.2 - Valores de f_c , f_c' , f_{ck} e desvio padrão.

| | SÉRIE 40-2 | SÉRIE 60 | SÉRIE 80 | SÉRIE 100 |
|----------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| f_c | 55.67 MPa | 65.11 MPa | 77.08 MPa | 91.64 Mpa |
| f_{ck} | 51.07 MPa | 57.65 MPa | 72.40 MPa | 81.34 Mpa |
| f_c' | 51.91 MPa | 59.01 MPa | 73.26 MPa | 83.22 Mpa |
| Desvio padrão | 2.80700 | 4.54669 | 2.85403 | 6.28169 |

Analisando-se os resultados acima surge a necessidade de verificar qual seria a causa de as resistências para as séries de 40 apresentarem uma variação tão elevada em relação a especificada. Uma possível explicação para isto seria a grande faixa de variação que a curva da figura 4.1, que relaciona a resistência desejada ao fator água/ material cimentício apresenta, pois ela é baseada em dados experimentais.

Como a resistência de 40 MPa é considerada o limite entre o CAD e o concreto convencional, foi cogitada a possibilidade de se utilizar outro método, tal como o ACI 211-1[20], voltado para seu limite superior, para obtenção de corpos de prova com resistências de 40 MPa. No entanto, não houve viabilidade de execução para tal em função do prazo.

Os histogramas apresentados na figura 5.1 ilustram uma representação gráfica da frequência de ocorrência dos resultados obtidos de resistência à compressão em cada série.

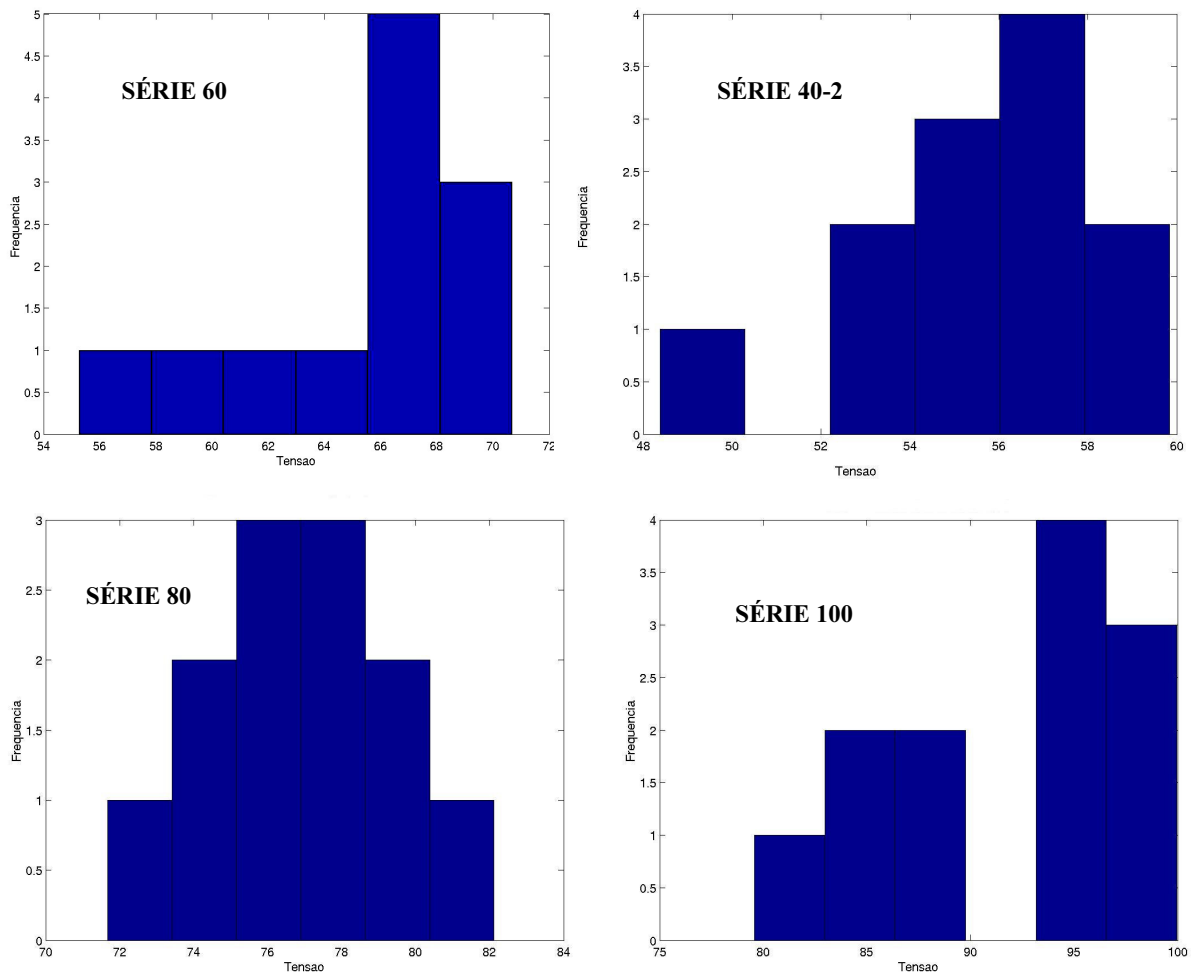


Figura 5.1 – Histogramas com frequência de ocorrência dos valores de resistências dos ensaios.

Para as séries estudadas aos 28 dias, a variação da resistência em função da redução do fator água/ material cimentício podendo ser constatada uma faixa de variação como demonstra a figura 5.2, que segue a proximidade da curva de Aïtcin, por exceção da série 60, que encontra-se bem próxima do limite superior da curva proposta por Aïtcin para dosagem.

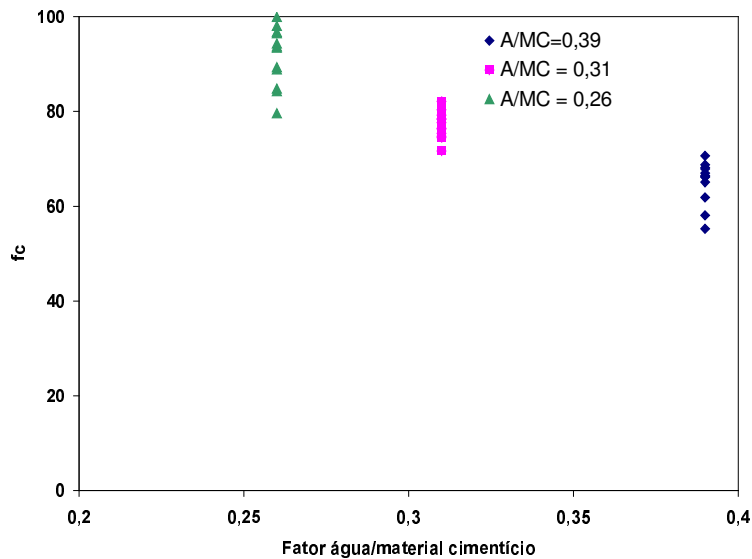


Figura 5.2 - Variação de resistência à compressão axial em função da variação do fator água/ material cimentício.

5.2 Resistência à tração por compressão diametral

A partir da realização dos ensaios, tendo sido obtida a carga de ruptura de cada corpo de prova, o valor da resistência à tração por compressão diametral foi calculado com base na expressão:

$$f_{sp} = \frac{2 \times T}{\pi \times L \times D},$$

onde :

T = carga de ruptura;

L = altura do corpo de prova;

D = diâmetro do corpo de prova.

Os resultados para resistência à tração por compressão diametral para os 12 corpos de prova ensaiados encontram-se relacionados na tabela 5.3 para as séries 40-1, 80 e 100. Conforme já relatado anteriormente, os valores de resistências da série 40-2 são apresentados com idade de 28 dias.

Tabela 5.3 - Valores de cargas e tensões obtidos nos ensaios de compressão diametral.

| AMOSTRA | SÉRIE 60 | | SÉRIE 40-2 | | SÉRIE 80 | | SÉRIE 100 | |
|---------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| | Carga (kN) | Tensão (MPa) | Carga (kN) | Tensão (MPa) | Carga (kN) | Tensão (MPa) | Carga (kN) | Tensão (MPa) |
| 01 | 195 | 6.21 | 134 | 4.26 | 174 | 5.54 | 216 | 6.87 |
| 02 | 146 | 4.64 | 160 | 5.09 | 189 | 6.02 | 220 | 7.00 |
| 03 | 194 | 6.17 | 120 | 3.82 | 189 | 6.02 | 223 | 7.09 |
| 04 | 139 | 4.42 | 154 | 4.90 | 199 | 6.33 | 190 | 6.04 |
| 05 | 181 | 5.76 | 140 | 4.46 | 170 | 5.41 | 170 | 5.41 |
| 06 | 180 | 5.72 | 131 | 4.17 | 150 | 4.77 | 207 | 6.59 |
| 07 | 165 | 5.25 | 151 | 4.81 | 185 | 5.88 | 225 | 7.16 |
| 08 | 172 | 5.47 | 155 | 4.93 | 170 | 5.41 | 203 | 6.46 |
| 09 | 180 | 5.73 | 143 | 4.55 | 175 | 5.57 | 219 | 6.97 |
| 10 | 194 | 6.17 | 170 | 5.41 | 186 | 5.92 | 225 | 7.16 |
| 11 | 167 | 5.32 | 154 | 4.90 | 186 | 5.92 | 180 | 5.73 |
| 12 | 174 | 5.54 | 150 | 4.77 | 170 | 5.41 | 230 | 7.32 |

Para elaboração de uma análise são apresentados os valores médios de f_{sp} , relacionados aos valores médios de f_c obtidos nos ensaios, visando estabelecer uma relação percentual da variação da resistência à tração com o incremento da resistência à compressão.

A tabela 5.4, com todos os valores expressos em MPa, estabelece esta relação, onde constata-se que a relação f_{sp} / f_c desce à medida que há grandes incrementos para resistência à compressão.

Tabela 5.4 - Valores médios e variação percentual de f_c e f_{sp} , expressos em MPa.

| | SÉRIE 60 | SÉRIE 40-2 | SÉRIE 80 | SÉRIE 100 |
|--------------------|----------|------------|----------|-----------|
| f_c | 65.11 | 55.67 | 77.08 | 91.64 |
| f_{sp} | 5.53 | 4.67 | 5.68 | 6.65 |
| f_{sp} / f_c (%) | 8.49 % | 8.33 % | 7.31 % | 7.26 % |

A tabela 5.5 apresenta os valores de resistência à tração calculados utilizando proposta das normas e dos estudos de alguns pesquisadores já citados anteriormente.

Tabela 5.5 - Resultados experimentais comparados a relações propostas na literatura. Expressos em MPa.

| | SÉRIE 60 | SÉRIE 40-2 | SÉRIE 80 | SÉRIE 100 |
|-------------------------------|----------|------------|----------|---------------|
| f_{sp} obtido nos ensaios | 5.53 | 4.67 | 5.68 | 6.65 |
| f_{sp} – CEB/90 | 5.42 | 4.88 | 6.07 | 6.81 |
| f_{sp} – Carrasquillo et al | 4.36 | 4.03 | 4.74 | Não aplicável |
| f_{sp} - ACI 318 | 4.52 | 4.18 | 4.92 | 5.36 |
| f_{sp} – Gomes | 5.39 | 5.02 | 5.81 | 6.27 |
| f_{sp} – Ahmad e Shah | 4.59 | 4.21 | 5.04 | Não aplicável |
| f_{sp} - Tachibana et al | 5.00 | 4.63 | 5.44 | 5.93 |

Observando-se a tabela , constata-se que, dentre todos os propostos, o que mais se aproxima dos obtidos experimentalmente são aqueles obtidos através da relação proposta pelo CEB/90[32], Tachibana et al [36] e Gomes [35].

Tal comportamento pode ser verificado através da figura 5.3, na qual visualiza-se o desenvolvimento das relações propostas através de curvas e dos valores obtidos experimentalmente através de pontos discretos.

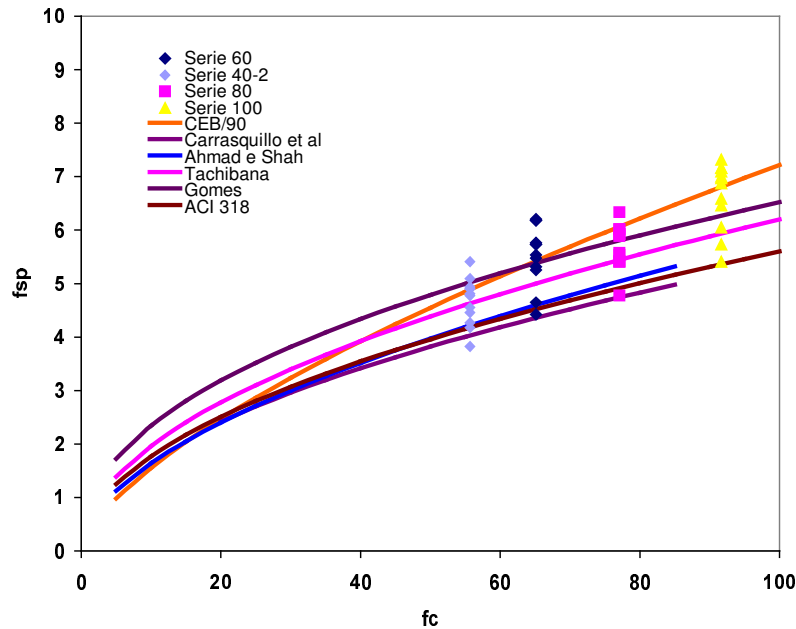


Figura 5.3 - Gráfico comparativo entre relações existentes e resultados experimentais de f_c e f_{sp} . f_c e f_{sp} expressos em MPa.

Observando-se a figura 5.3, percebe-se que a relação de Gomes e Tachibana tem boa aproximação do valor médio das resistências obtidas experimentalmente. A relação proposta pelo CEB, apesar de apresentar uma boa aproximação para estes patamares de resistências estudados, apresenta uma tendência em superestimar valores de resistências mais altas em relação à média dos valores obtidos nos ensaios.

5.3 Módulo de Elasticidade ou Módulo de Deformação e Comportamento Tensão x Deformação

Os estudos de módulo de elasticidade foram realizados somente para as séries 60, 80 e 100. Assim como a resistência à tração por compressão diametral, os valores de módulo de elasticidade obtidos também são relacionados à resistência à compressão axial.

5.3.1 Módulo de Elasticidade Tangente Inicial

Para os corpos de prova instrumentados utilizando extensômetros elétricos como medidores de deformação, calculou-se o módulo tangente, que corresponde à inclinação da reta tangente à curva tensão x deformação, conforme orientação da NBR 8522/84[34], expressa pela fórmula:

$$E_{c0} = 2 \frac{\sigma_{sup} - \sigma_{inf}}{\varepsilon_{0,3} - \varepsilon_0 + \varepsilon'_{0,3} - \varepsilon'_0}$$

onde:

E_{c0} = módulo de elasticidade tangente inicial;

σ_{sup} = tensão equivalente a 30% da carga de ruptura;

σ_{inf} = tensão de 0,5 MPa;

$\varepsilon_{0,3}$ = deformação correspondente a 30% da carga de ruptura no 6º ciclo de carregamento;

ε_0 = deformação correspondente à leitura inicial após o 5º ciclo de carregamento;

$\varepsilon_{0,3}'$ = deformação correspondente à leitura de 30% da carga de ruptura para o carregamento contínuo;

ε_0' = deformação correspondente à leitura inicial após o sexto ciclo de carregamento.

Aplicando-se a fórmula acima aos dados das leituras constantes no Apêndice 2 desta dissertação, obteve-se os dados da tabela 5.6 , que apresenta para cada série os valores de módulos de elasticidade obtidos com as 4 amostras ensaiadas para cada uma das séries.

Tabela 5.6 - Valores de módulo de elasticidade tangente inicial

| AMOSTRA | SÉRIE 60 | SÉRIE 80 | SÉRIE 100 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 01 | 40.33 GPa | 38.67 GPa | 40.89 GPa |
| 02 | 40.65 GPa | 37.34 GPa | 51.33 GPa |
| 03 | 41.67 GPa | 39.37 GPa | 50.19 GPa |
| 04 | 39.67 GPa | 41.91 GPa | 42.59 GPa |

A partir dos valores obtidos experimentalmente, foi determinado o valor do módulo de elasticidade médio e devido coeficiente de variação, apresentados na tabela 5.7. O valor médio será utilizado como referência para comparação com os valores obtidos pelas relações existentes na literatura.

Tabela 5.7 - Valores médios de Módulo de Elasticidade Tangente Inicial

| | Módulo de Elasticidade Tangente Inicial (E_0) | Variação |
|------------------|---|-----------------|
| SÉRIE 60 | 40.58 GPa | 1.65% - 5.05% |
| SÉRIE 80 | 39.32 GPa | 3.50% - 12.29% |
| SÉRIE 100 | 46.25 GPa | 2.28%- 25.52% |

A partir da obtenção dos valores médios de módulo de elasticidade tangente inicial, os resultados obtidos experimentalmente foram comparados às relações propostas na literatura, já apresentadas nesta dissertação no capítulo 3. A tabela 5.8 ilustra um paralelo entre tais valores.

Tabela 5.8 - Resultados experimentais comparados a relações propostas na literatura. Expressos em GPa.

| | SÉRIE 60 | SÉRIE 80 | SÉRIE 100 |
|--|-----------------|-----------------|------------------|
| E_0 obtido nos ensaios | 40.58 GPa | 39.32 GPa | 46.25 GPa |
| E_0 - NBR 6118-78 | 53.26 GPa | 57.94 GPa | 63.18 GPa |
| E_0 - MC 90 | 36.24 GPa | 37.93 GPa | 39.77 GPa |
| E_0 - Paulo Helene | 41.72 GPa | 43.88 GPa | 46.26 GPa |

Analisando-se os resultados, verifica-se que os valores obtidos através do NBR 6118-78[31] superestimam o valor do módulo de deformação tangente inicial, enquanto que os obtidos através do MC-90[10] subestimam tais valores. A figura 5.4 ilustra tal comportamento. A proposta de Paulo Helene apresenta uma boa estimativa, muito próxima da média.

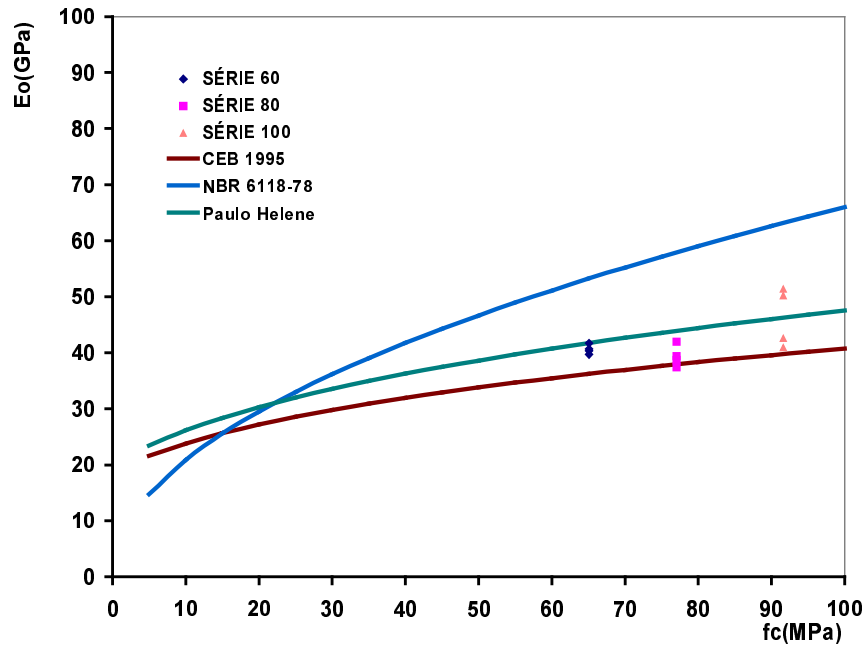


Figura 5.4 - Gráfico comparativo entre relações existentes e resultados experimentais de f_c e E_0 .

Em todos os resultados, inclusive nas relações propostas na literatura, há um aumento do módulo de elasticidade com o aumento da resistência. No entanto, nos valores experimentais obtidos para a série 80 constatou-se que o módulo de elasticidade médio está inferior ao módulo de elasticidade para a série 60. Uma explicação para tal é que os valores finais de resistência à compressão axial média nestas duas séries encontram-se bem próximos (65.11 MPa para 77.08 MPa), aliado à faixa de variação dos valores médios obtidos do módulo de elasticidade.

5.3.2 Módulo de Elasticidade Secante

Analogamente ao procedimento realizado para obtenção dos módulos tangente inicial, foram utilizadas outras 4 amostras de cada série para cálculo do

módulo secante, através de dados obtidos com a aquisição de dados através de clip gage .

Para obtenção do módulo secante, o plano de carga prevê um carregamento contínuo, com intervalos apenas para leitura dos dados, se for o caso. Desta forma, os corpos de prova ensaiados na INSTRON, com aquisição de dados automatizada são amostras mais adequadas para o cálculo do módulo secante.

Como o plano de carga que regulamenta a obtenção do módulo tangente, após os ciclos sucessivos, apresenta um carregamento crescente contínuo, os dados obtidos com as leituras de extensômetros elétricos também serão utilizados aqui para obtenção de módulo secante.

O módulo secante foi calculado através da relação prevista na NBR 8522 [34], que especifica:

$$E_{sec} = \frac{\sigma_n - \sigma_{inf}}{\epsilon_n - \epsilon_0} ,$$

onde:

E_{sec} = módulo de elasticidade, correspondente à inclinação da reta secante a curva entre os pontos onde atuam as tensões σ_n e σ_{inf} ;

σ_n = tensão equivalente a 40% da carga de ruptura;

σ_{inf} = tensão de 0,5 MPa;

ϵ_n = deformação correspondente a 40% da carga de ruptura;

ϵ_0 = deformação correspondente à leitura inicial de σ_{inf} ;

Calculando-se os valores de módulo de elasticidade secante em conformidade com a relação acima, encontram-se os valores relacionados na tabela 5.9 para as amostras instrumentadas com extensômetros elétricos e com clip gage.

Tabela 5.9 - Valores de módulo de elasticidade secante segundo a NBR 8522 .

| Amostra | SÉRIE 60 | SÉRIE 80 | SÉRIE 100 |
|----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 01 | 29.62 GPa | 31.06 GPa | 39.80 GPa |
| 02 | 28.47 GPa | 32.68 GPa | 45.66 GPa |
| 03 | 30.49 GPa | 32.59 GPa | 44.98 GPa |
| 04 | 29.42 GPa | 35.08 GPa | 36.35 GPa |
| 05 | 32.63 GPa | 54.76 GPa | 39.05 GPa |
| 06 | 25.88 GPa | 23.72 GPa | 47.77 GPa |
| 07 | 30.06 GPa | 35.61 GPa | 37.27 GPa |
| 08 | 30.03 GPa | 24.47 GPa | 45.76 GPa |

Como os dados das deformações foram obtidos de duas formas de instrumentação diferentes (uma através de extensômetros elétricos e outra através de clip gage), serão calculadas duas médias distintas, uma para cada sistema de medição diferente.

Os valores médios calculados a partir do resultados de cada amostra estão relacionados na tabela 5.10, assim como a devida variação entre os valores.

Tabela 5.10 - Valores médios de módulo de elasticidade secante

| | Instrumentação | Módulo de Elasticidade Secante (E_{sec}) – médio | Varição |
|------------------|-----------------------|--|----------------|
| SÉRIE 60 | Extensômetro | 29.05 GPa | 0.67% - 7.09% |
| SÉRIE 80 | Extensômetro | 32.85 GPa | 0.27% - 12.90% |
| SÉRIE 100 | Extensômetro | 42.65 GPa | 1.51% - 25.61% |
| SÉRIE 60 | Clip gage | 29.65 GPa | 0.09% - 26.08% |
| SÉRIE 80 | Clip gage | 34.64 GPa | 3.16% - 130% |
| SÉRIE 100 | Clip gage | 42.46 GPa | 4.39% - 22.33% |

Verificando-se os dados da tabela 5.9, percebe-se uma disparidade muito grande nos resultados obtidos para série 80, para os corpos de prova instrumentados com clip gage. De fato, nesta condição de ensaio, a série 80 foi a

primeira a ser ensaiada e alguns problemas de ajuste da máquina ocorreram com os corpos de prova, gerando a ruptura precoce de 3 amostras. Mesmo assim, o primeiro resultado computado teve uma medida de deformação negativa até uma tensão de aproximadamente 11MPa.

Caso a consideração dos resultados ocorresse em função do valor médio, a tabela 5.10 representaria os resultados de forma satisfatória, para a instrumentação com clip gage. No entanto, pelos motivos anteriormente citados, considera-se que estes valores obtidos para módulo secante da série 80, com este tipo de instrumentação não são confiáveis por apresentar uma faixa de variação muito grande.

Para os valores obtidos a partir da instrumentação com extensômetros elétricos, os resultados apresentam-se de forma coerente, expressando valores médios confiáveis de resultados. A tabela 5.11 apresenta um quadro comparativo entre os valores obtidos experimentalmente e as relações existentes na literatura.

Tabela 5.11 - Quadro comparativo entre valores de módulo secante constantes na literatura e obtidos nos ensaios.

| | <i>SÉRIE 60</i> | <i>SÉRIE 80</i> | <i>SÉRIE 100</i> |
|---|-----------------|-----------------|------------------|
| <i>E_{sec} obtido nos ensaios</i> | 29.65 GPa | - | 42.46 Gpa |
| <i>Com clip gage</i> | | | |
| <i>E_{sec} obtido nos ensaios</i> | 29.05 GPa | 32.85 GPa | 42.65 GPa |
| <i>Com extensômetros</i> | | | |
| <i>E_{sec} –Shehata et al</i> | 34.29 GPa | 37.31 GPa | 40.68 Gpa |
| <i>E_{sec} – Carrasquillo et al</i> | 33.69 GPa | 36.05 GPa | 38.61 Gpa |
| <i>E_{sec} - ACI 318</i> | 38.17 GPa | 41.53 GPa | Não aplicável |

Para as demais séries, verifica-se que as relações propostas por Shehata et al[47] e Carrasquillo et al[45] superestimam o valor para a série 60 e subestimam para série 100. A relação proposta pelo ACI 318[44] superestima o valor do módulo de elasticidade para os valores de resistência estudados. A figura 5.4 ilustra o comportamento da séries estudadas em comparação às relações propostas.

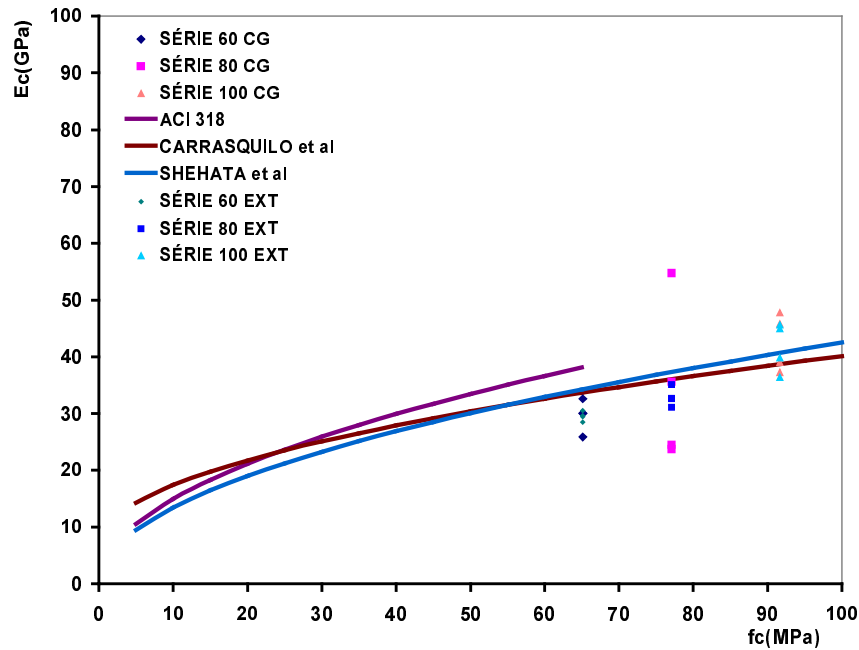


Figura 5.5 - Gráfico comparativo entre relações existentes e resultados experimentais de f_c e E_{sec} .

5.3.3 Comportamento Tensão x Deformação

As curvas tensão x deformação apresentadas na figuras 5.6, 5.7 e 5.8, geradas a partir da leitura dos dados com extensômetros elétricos para cada série, demonstram claramente a diferença entre a inclinação da reta tangente inicial para cada uma das séries dos corpos de prova ensaiados.

Outro ponto relevante a ser observado é que torna-se impossível medir a deformação na ruptura e o trecho pós ruptura com utilização de extensômetros. Assim sendo, para efeito de registro dos pontos marcados referentes a ruptura de cada corpo de prova, foi realizada uma extrapolação baseando-se nos dados de deformação dos pontos imediatamente anteriores. Daí, as curvas a seguir apresentarem um trecho distinto referente à extrapolação da deformação na ruptura.

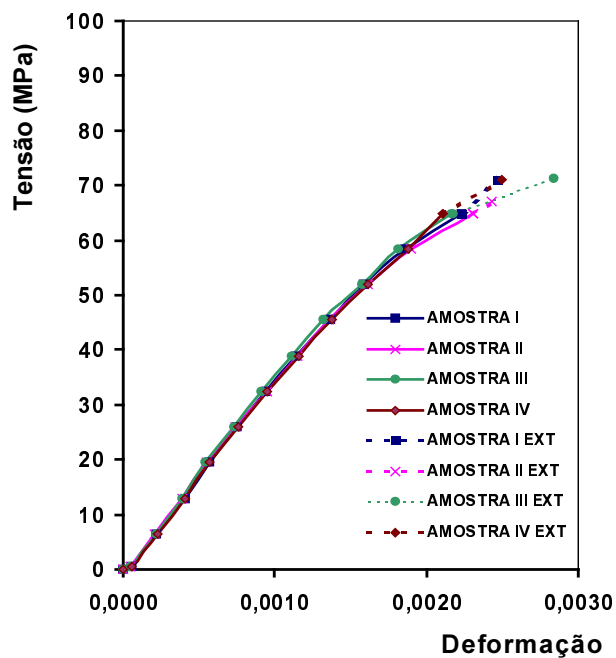


Figura 5.6 - Gráfico tensão x deformação para série 60.

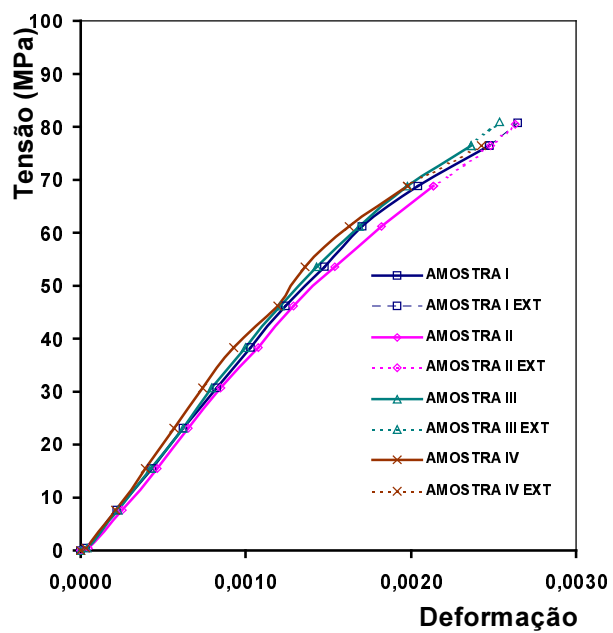


Figura 5.7 - Gráfico tensão x deformação para série 80.

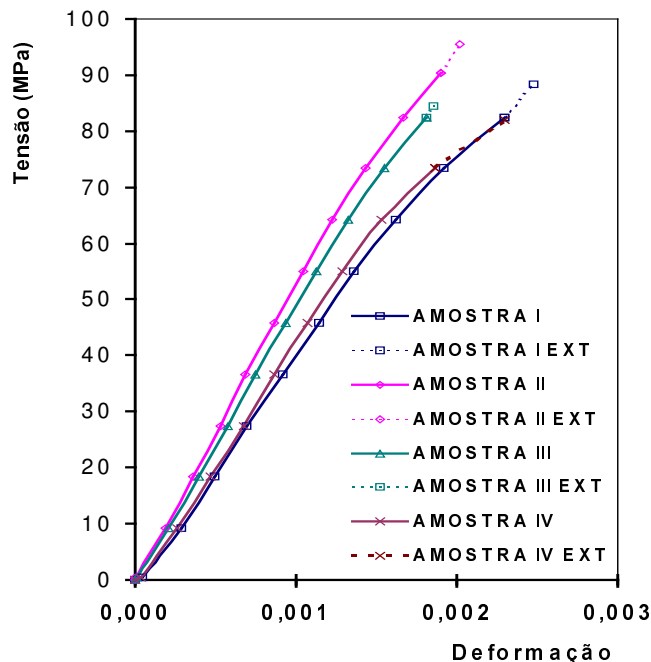


Figura 5.8 - Gráfico tensão x deformação para série 100

Analisando-se as curvas tensão x deformação para as diversas resistências, constata-se um comportamento da curva que pode ser considerado com um tramo linear variando de 69% a 77% da carga de ruptura. Nos concretos convencionais, tal comportamento diverge para uma solitação correspondente a aproximadamente 40% da tensão de ruptura. Tal comportamento pode ser atribuído a menor micro fissuração no CAD em relação aos concretos convencionais.

Outro ponto interessante a ser percebido nas curvas apresentadas é que para as séries 60 as 4 curvas estão sobrepostas. Para série 80, tal comportamento também se repete. No entanto, para a série 100, as curvas apresentam-se de forma bem distinta. A justificativa para tal pode ser considerada como os fatores que influenciam diretamente o módulo de deformação. Inicialmente, pode-se considerar que os agregados graúdos à base de gnaise provavelmente chegaram a seu limite.

5.4 Estudo da Porosidade

Conforme abordado anteriormente, uma das principais vantagens da utilização do CAD é característica de sua durabilidade associada a sua capacidade de resistência a meios agressivos.

O estudo de porosidade foi realizado com o objetivo de tentar relacionar o índice de vazios com a resistência dos concretos elaborados. O índice de vazios, sem dúvida, tem forte influência sobre a durabilidade do concreto, uma vez que possui relação direta com sua permeabilidade.

Todos os corpos de prova foram pesados nas condições de : secos em estufa, saturados com superfície seca e imersos em balança hidrostática. A tabela 5.12 apresenta todos os valores obtidos nas pesagens, com o cálculo do índice de vazios.

Tabela 5.12 - Valores das massas das amostras em condições distintas, expressos em gramas e índice de vazios em %.

| SÉRIE | Amostra | Corpo de prova seco em estufa (M_s) | Corpo de prova seco com superfície saturada (M_{sat}) | Corpo de prova imerso (M_I) | Porosidade (%) |
|-------|---------|---|---|---------------------------------|----------------|
| 40-1 | 01 | 5906.00 | 6186.00 | 1574.90 | 6.072 |
| | 02 | 5848.00 | 6118.00 | 1516.90 | 5.868 |
| | 03 | 5904.00 | 6189.00 | 1586.70 | 6.193 |
| | 04 | 5848.00 | 6118.00 | 1535.00 | 5.891 |
| 80 | 01 | 5933.00 | 6199.50 | 1607.70 | 5.804 |
| | 02 | 5913.00 | 6144.00 | 1568.60 | 5.049 |
| | 03 | 5901.00 | 6171.00 | 1572.90 | 5.872 |
| | 04 | 5947.00 | 6221.50 | 1672.00 | 6.034 |
| 100 | 01 | 5999.00 | 6266.00 | 1667.50 | 5.806 |
| | 02 | 6007.00 | 6247.00 | 1674.90 | 5.249 |
| | 03 | 5998.00 | 6264.50 | 1651.3 | 5.776 |
| | 04 | 5983.00 | 6244.00 | 1641.00 | 5.670 |

A partir da determinação do índice de vazios para cada amostra, foi calculada uma média e este valor foi comparado ao valor médio da resistência à compressão axial f_c , como demonstra a tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Valores de porosidade relacionados à f_c .

| | f_c (MPa) | Porosidade (%) |
|------------------|-------------|----------------|
| SÉRIE 60 | 65.11 | 6.006 |
| SÉRIE 80 | 77.08 | 5.689 |
| SÉRIE 100 | 92.64 | 5.625 |

Com base neste valores, foi plotado um gráfico na figura 5.9, relacionando a resistência à porosidade.

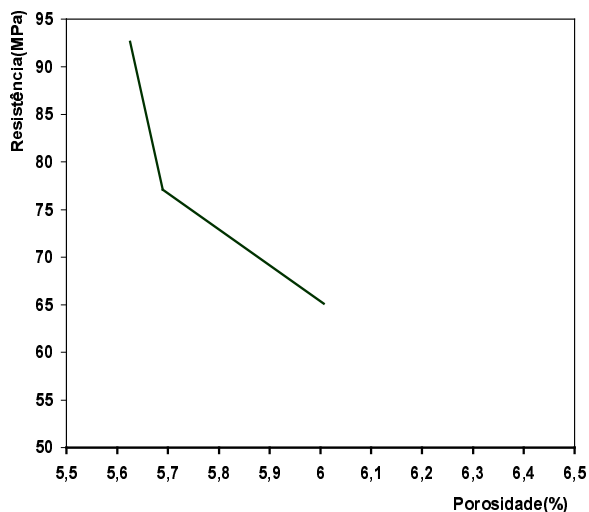


Figura 5.9 - Variação da resistência em função da porosidade.

Analisando-se a figura acima percebe-se um decréscimo da porosidade à medida que há um aumento da resistência. Este fato deve-se à comprovação que a matriz para concretos de alto desempenho torna-se mais densa gerando uma

redução significativa da porosidade em relação aos concretos convencionais, nos quais, em geral, o índice de vazios ultrapassa 10%.

Considerando, ainda, que no caso específico dos concretos dosados para este estudo, foi utilizada a sílica ativa que também atua como um micro fíler, preenchendo os espaços intersticiais entre grãos de cimento, agregados e matriz, gerando uma contribuição significativa para redução da porosidade dos concretos.

As figuras 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 ilustram a micro estrutura dos concretos estudados, ilustrando a diferença entre as porosidades com a evolução da resistência.

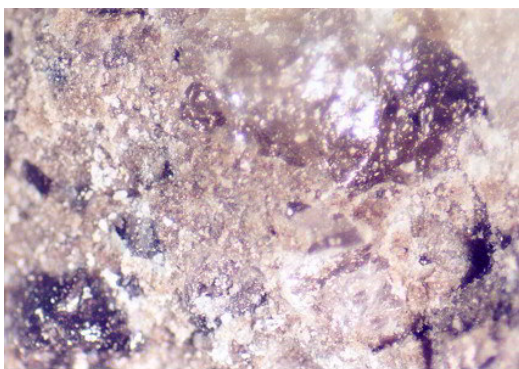


Figura 5.10– Micro estrutura da série 100 com ampliação de 22 vezes.

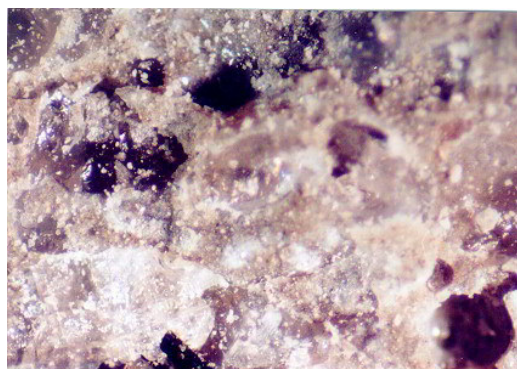


Figura 5.11 – Micro estrutura da série 80 com ampliação de 22 vezes.

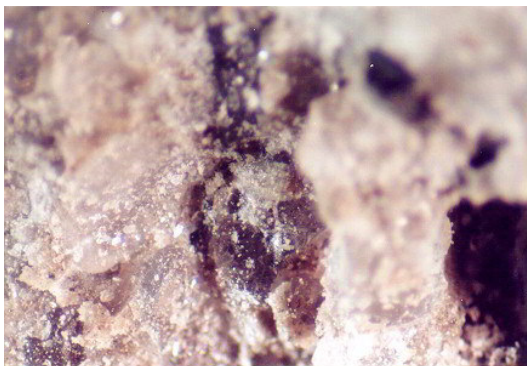


Figura 5.12 – Micro estrutura da série 60 com ampliação de 22 vezes.



Figura 5.13 - Micro estrutura da série 100 com ampliação de 12.5 vezes.

Analisando-se as figuras 5.10, 5.11, 5.12 percebe-se claramente a diminuição do tamanho dos poros, assim como a matriz torna-se mais densa para a série 100. A figura 5.13, com menor ampliação oferece uma visualização de maior campo da série 100.

5.5

Estudo da Compatibilidade entre Aglomerante e Material Cimentício

Pela metodologia de dosagem apresentada, especifica-se que caso o ponto de saturação para um determinado traço não seja conhecido, pode-se iniciar os procedimentos de dosagem com um teor de superplastificante de 1%. No entanto, ao elaborar-se o concreto para ser estudado no ensaio piloto, constatou-se o problema de falta de trabalhabilidade do concreto fresco, daí o teor de superplastificante dos demais concretos ter sido incrementado para 1.2%.

O estudo de compatibilidade entre material cimentício e superplastificante foi introduzido nesta dissertação com objetivo de verificar a causa da pouca trabalhabilidade nos concretos frescos, constatada através do ensaio de abatimento pelo método do tronco de cone.

Assim sendo, à medida que o estudo foi iniciado, percebeu-se todas as suas implicações e sua grande importância, não só para verificação da falta de abatimento como para determinar o ponto de saturação entre o material cimentício e superplastificante adotado e a forma que influencia na reologia do concreto.

Conforme descrito nos procedimentos experimentais, foram elaborados estudos de compatibilidade para os fatores água/ material cimentício de 0.35 e 0.40. A escolha do intervalo entre estes dois fatores deve-se ao fato de que, como para pequenos teores de saturação, o escoamento com o fator 0.35 foi difícil e até mesmo inviável, o fator de 0.40 geraria uma pasta mais fluida, o que facilitaria a observação do comportamento da pasta até 75 minutos. As figuras 5.14 e 5.15 representam os resultados obtidos com os testes de compatibilidade pelo método do funil de Marsh.

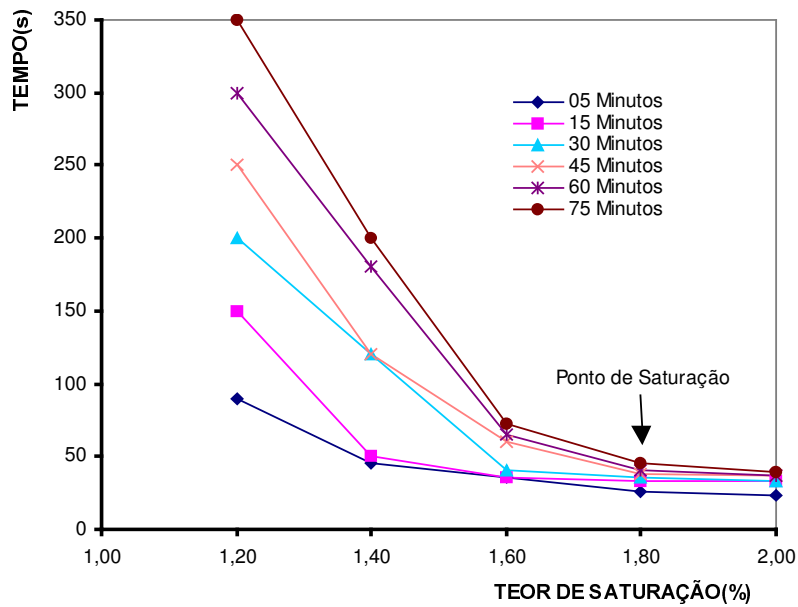


Figura 5.14 - Representação gráfica do estudo de compatibilidade para fator a /material cimentício de 0.35.

Para o fator água/ material cimentício de 0.35, com um teor de 1% de superplastificante, não foi possível medir o tempo de escoamento, pois a mistura endurecia muito rapidamente e não conseguia fluir pelo funil.

Desta forma, as medições começaram a ser viáveis a partir do teor de 1.2% de superplastificante. Mesmo assim, o gráfico demonstra que os tempos de escoamento foram muito grandes e que para as medições a partir de 30 minutos, a mistura não conseguia preencher totalmente 1 litro da proveta abaixo do funil, ficando parte da mistura retida em seu interior. No entanto, prosseguiu-se com as medições para efeito de comparação com os maiores teores.

Dando-se sequência às medições de tempo de escoamento, percebe-se que a mistura não se mostrou totalmente incompatível, sendo classificada como um caso intermediário. Para teores de saturação de superplastificantes até 1.4% o escoamento é difícil e não pode-se considerar que há compatibilidade entre material cimentício e superplastificante. No entanto, para teores de saturação maiores que 1.4%, o comportamento da mistura já pode ser considerado mais compatível, sendo o ponto de saturação determinado para um teor de 1.8%.

Para a mistura utilizando um fator água/material cimentício de 0.40, conforme ilustrado pela figura 5.15, o comportamento ocorreu de forma distinta.

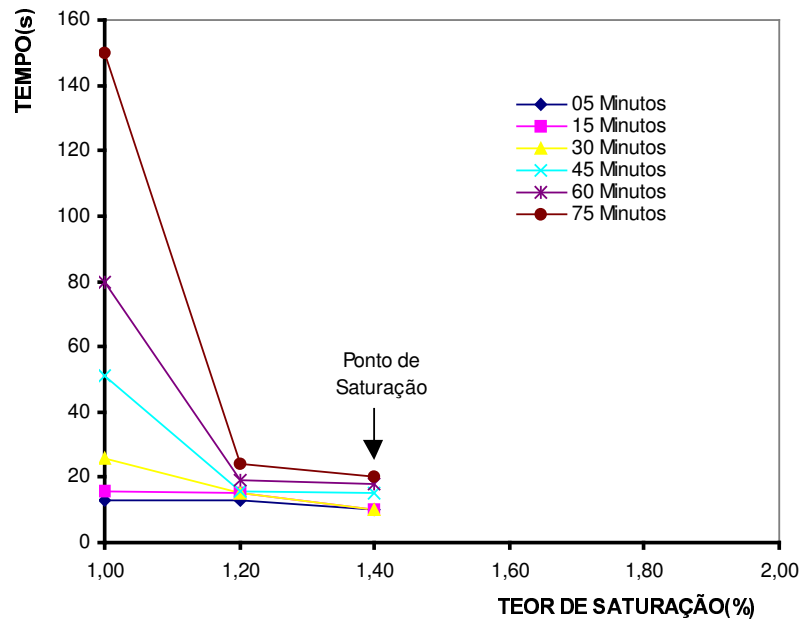


Figura 5.15 - Representação gráfica do estudo de compatibilidade para fator a/material cimentício de 0.40.

Para a mistura com fator água/ material cimentício de 0.40, conseguiu-se, com certa dificuldade, medir o tempo de escoamento para um teor de saturação de 1%. Percebe-se um decréscimo rápido do tempo de escoamento quando aumentamos o teor para 1.2%, a mistura passa a apresenta-se muito fluida, sendo percebido, assim, a determinação do ponto de saturação.

Com todos os dados acima, várias conclusões podem ser obtidas. No entanto, prevalecendo o objetivo inicial que era de estudar o problema da falta de abatimento nos concretos preparados, verificou-se primordialmente que para um teor de saturação de 1%, como utilizado no ensaio piloto e de 1.2% nos demais concretos, corresponde a um teor insatisfatório para a utilização com cimento CPV e sílica ativa.

Considerando as recomendações de Aïtcin[3], se o estudo de compatibilidade fosse elaborado antes da moldagem dos corpos de prova, certamente modificações deveriam ter sido introduzidas para melhorar a reologia do concreto fresco. Tais alterações poderiam consistir em mudar o tipo de cimento e/ou o superplastificante ou introduzir um retardador de pega para melhorar a reologia do concreto.