

CAPÍTULO 6 – COMPORTAMENTO MECÂNICO

6.1. Introdução

Este capítulo é dedicado à apresentação dos resultados obtidos em compressão simples e tracção (por flexão) de argamassas geopoliméricas do tipo CB e betões geopoliméricos em várias composições, idades e condições de activação.

Dentro dos conceitos usuais do comportamento mecânico das argamassas e betões fabricados com CPN, foram realizados ensaios para investigar a variação das resistências à compressão e à tracção por flexão com a idade, com diferentes concentrações do activador simples (hidróxido de sódio) e, em cada concentração, com diferentes razões ACT/MC.

Em relação às argamassas, os resultados da variação com a idade do provete são apresentados em duas fases distintas conforme se referem ao comportamento a curto prazo (7, 14 e 28 dias) ou quando se aborda a evolução em idades mais avançadas das resistências obtidas (aos 60, 90 e, em alguns casos, 120 dias). A primeira fase comporta um número apreciável de ensaios, pois foram estudadas 3 concentrações de activador simples (12M, 15M e 18M), 2 concentrações (12M e 15M) com substituição de 20% de metacaulino por cal, 5 razões ACT/MC (1-0.90-0.95-0.80-0.75) em cada concentração e consideradas 3 idades de ensaio (7, 14 e 28 dias).

Em cada situação definida de concentração do activador, com presença ou ausência de cal, de razão ACT/MC e de idade, foram fabricados 3 provetes que, após envolvimento em filme de polietileno, foram curados à temperatura

ambiente e ensaiados à compressão simples e à tracção por flexão. A combinação de todas as possibilidades conduziu ao ensaio de 225 provetes na primeira fase dos trabalhos.

A segunda fase envolveu menos ensaios, já que apenas se procurou averiguar a tendência da evolução das resistências com idades um pouco mais avançadas (60, 90 ou até 120 dias), em cada um dos campos referidos (concentração do activador, presença ou não de cal e razão ACT/MC).

A substituição parcial (20%) de metacaulino por cal que é feita na composição das argamassas, teve como objectivo explorar o comportamento destas em face da presença do hidróxido de cálcio, pois, como se referiu no Cap. 1, os compostos com um teor importante em cálcio (expresso em CaO) constituem uma das duas vias básicas de obtenção de geopolímeros, sendo a outra constituída pelos compostos alumino-silicatados em que o teor em cal é muito baixo ou nulo (percentagem expressa em óxido de cálcio inferior a 2%). A activação de uma mistura de cal com metacaulino fornece um meio adequado para apreciar a influência que esse produto pode ter na estabilidade dos resultados e do nível que estes possam atingir, quando se fazem paralelamente ensaios sobre as mesmas composições sem adição de cal.

Ao contrário do que é convencional nos estudos sobre o cimento Portland, os estudos de comportamento mecânico incidiram neste trabalho sobre argamassas (e betões) e não sobre a pasta simples sem qualquer agregado, por dois motivos essenciais:

- em primeiro lugar por razões de controlo da retracção que é muito elevada ao nível do metacaulino activado, se usado isoladamente, isto é, sem quaisquer agregados ou cargas;

- em segundo lugar porque a geopolimerização não se verifica unicamente no metacaulino, antes pode ser promovida em quase todos os alumino-silicatos, em maior ou menor grau consoante a sua cristalinidade; logo, a noção de material ligante é mais ampla, não ficando limitada apenas ao metacaulino.

Os betões geopoliméricos, para os quais se propõe a designação genérica de **geobetões**, foram activados unicamente com activador composto (hidróxido e silicato de sódio).

Fez-se também uma abordagem aos activadores potássicos (simples e compostos), mas o nível de resultados encontrados, inferior ao que se conseguiu com os activadores sódicos, bem como o custo superior desses materiais (por exemplo em Portugal não se fabrica nem comercializa o silicato de potássio), não encorajaram desenvolvimentos nesse domínio. Não pareceu relevante a apresentação dos resultados obtidos.

6.2. Activação de argamassas com NaOH (Activador Simples)

O metacaulino usado neste trabalho foi obtido a partir do caulino Mibal-A, que foi preparado de acordo com as condições definidas no Cap. 4.

A composição das argamassas foi sempre a mesma (composição base CB), apenas se alterando a dosagem e a concentração do activador, ou quando foi o caso, se procedeu à substituição de metacaulino por cal. Nos Quadros 2.12. e 2.13. no Cap. 2 são indicadas as composições adoptadas.

A adopção de uma composição elementar como é a composição CB teve como objectivo tentar perceber mais facilmente a influência da concentração do activador, da diminuição gradual da fase líquida (razão ACT/MC) e a evolução no

tempo das resistências mecânicas que foram analisadas, não fazendo intervir outros componentes que pudessem eventualmente direccionar ou condicionar os fenómenos reactivos.

6.2.1. Activador NaOH-12M

6.2.1.1. Compressão Simples

O Quadro 6.1. apresenta os valores médios das resistências à compressão simples de 3 provetes, activados com Hidróxido de Sódio (NaOH) a 12M, com várias razões ACT/MC (activador/metacaulino) e ensaiados aos 7, aos 14 e aos 28 dias. O Quadro refere os resultados obtidos quando não foi considerada a substituição parcial de metacaulino por cal, bem como os valores de ensaio obtidos quando se procedeu à referida substituição. Nas composições em que se fez substituição de metacaulino por cal, a razão ACT/MC foi calculada em relação ao conjunto “metacaulino+cal”.

Quadro 6.1. - NaOH-12M-Resistências à Compressão Simples (MPa)

<i>Razão ACT/MC</i>	<i>Compressão Simples Sem Cal</i>			<i>Compressão Simples Com Cal</i>		
	<i>7d</i>	<i>14 d</i>	<i>28d</i>	<i>7d</i>	<i>14d</i>	<i>28d</i>
1.00	8.44	13.42	19.28	11.11	14.79	14.92
0.90	12.46	14.43	22.69	12.21	17.36	19.99
0.85	14.72	15.30	20.06	11.69	23.12	26.86
0.80	17.31	13.88	20.05	19.22	30.24	30.57
0.75	18.34	17.76	24.33	23.54	29.23	49.12

A Figura 6.1. apresenta sob a forma gráfica a evolução em conjunto, para melhor se poder fazer a comparação dos resultados das resistências à compressão simples das argamassas sem e com cal, em função da razão ACT/MC e da idade à data do ensaio.

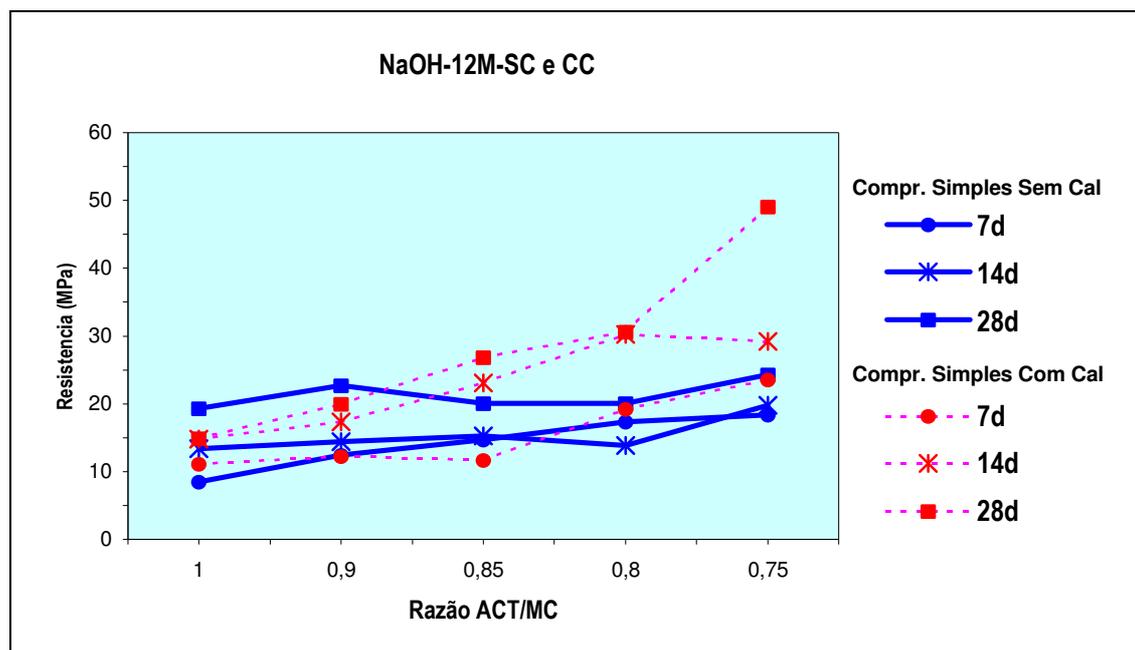


Fig. 6.1. - NaOH-12M - Compressão Simples em Argamassas

Verificam-se algumas diferenças sensíveis no andamento das duas famílias de curvas. Enquanto que nas curvas a cheio, representativas das resistências de provetes sem cal, é menos marcada a variação das resistências com a diminuição da razão ACT/MC, na família de curvas relativa aos provetes onde foi incluída cal na composição (curvas a tracejado), regista-se uma nítida tendência para o aumento dos valores das resistências à compressão à medida que vai diminuindo a presença da fase líquida (menores razões ACT/MC).

Por outro lado, e ainda que de um modo desigual em todas as idades e composições, pode ver-se que as resistências dos provetes com cal são mais elevadas do que aquelas onde a cal está ausente, situação que é mais nítida nas composições em que a razão ACT/MC é mais baixa (<0.90). Tomando para comparação o valor aos 28 dias, idade em que se pode considerar mais completo o processo reactivo, as resistências dos provetes sem cal situam-se à volta dos 20 MPa, enquanto naqueles onde a cal foi incluída se pode ver que as resistências à

compressão simples se situam francamente no patamar dos 30 MPa, com um valor aparentemente díspar de quase 50 MPa na razão ACT/MC = 0.75.

Nos provetes sem cal, a resistência à compressão simples na idade mais precoce (7dias) apresenta uma tendência clara para subir com a redução da razão ACT/MC, não sendo tal efeito tão nítido nas idades de 14 e 28 dias. Nas composições com cal, a tendência para aumento das resistências com a diminuição da razão ACT/MC é mais clara em qualquer das idades consideradas.

A Fig. 6.2. mostra, no caso da composição sem cal e para cada valor da razão ACT/MC, a forma como as resistências à compressão evoluem com a idade dos provetes à data do ensaio. De um modo geral, verifica-se que os valores das resistências tendem a aumentar com a idade e com a diminuição da razão ACT/MC. Regista-se um ponto anómalo aos 14 dias e com a razão ACT/MC=0.80, tratando-se muito possivelmente de um valor dentro da dispersão própria que este tipo de materiais costuma apresentar.

Pode dizer-se que os resultados estão de acordo com a tendência esperada, ou seja, a evolução positiva da resistência à compressão simples com a idade e a diminuição da razão ACT/MC.

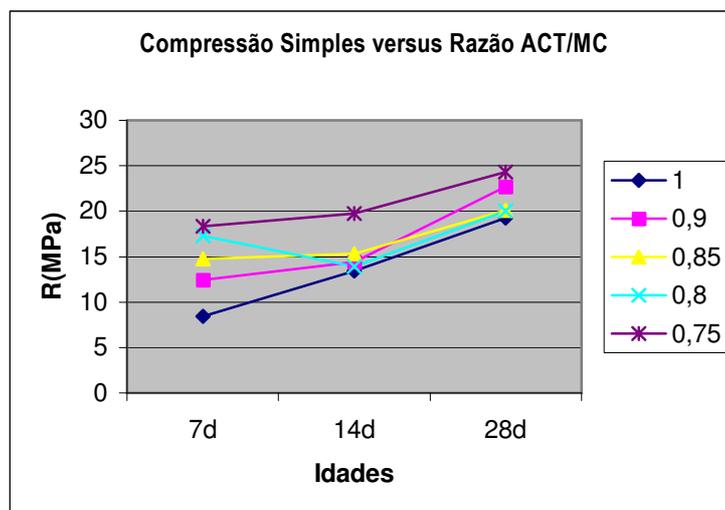


Fig. 6.2. - NaOH-12M-SC - Evolução das Resistências à Compressão com a Idade

A Fig. 6.3. mostra o mesmo gráfico para os provetes fabricados com hidróxido de cálcio na sua composição.

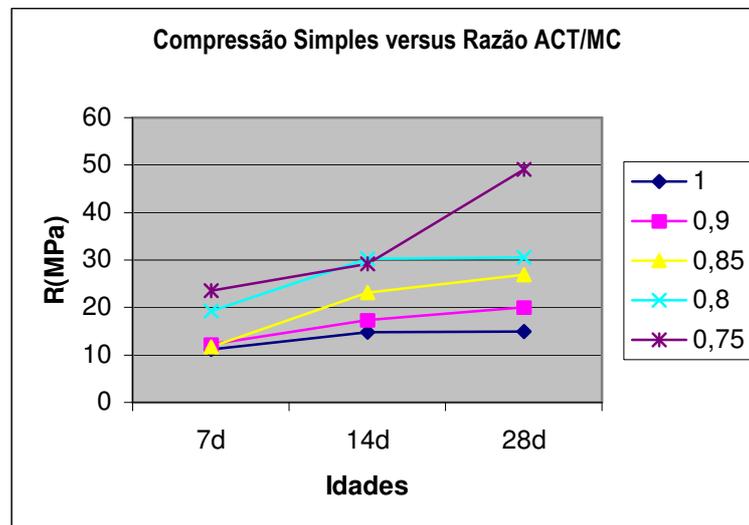


Fig. 6.3. - NaOH-12M-CC - Evolução das Resistências à Compressão com a Idade

Além de uma definição mais nítida, pois todas as curvas evoluem no sentido esperado (aumento das resistências com a idade), registando-se também aumento das resistências com a diminuição da razão ACT/MC, verifica-se que o andamento das curvas (com excepção de uma) é muito semelhante ao das curvas de ganho de resistência com a idade que se conhece no cimento Portland: evolução mais rápida entre os 7 e os 14 dias, verificando-se depois uma atenuação entre os 14 e os 28 dias, indicando que os valores tendem para um valor assintótico.

A excepção está na curva referente à razão ACT/MC mais baixa (0.75) onde a resistência aos 28 dias atinge um valor, como se referiu atrás, um pouco inesperado. A análise dos resultados individuais obtidos nos 3 provetes ensaiados nessa data (50.41-48.13-48.81) mostra consistência entre si, não sendo a média desvirtuada por um qualquer valor anómalo. É provável que o sucedido seja apenas o resultado de condições óptimas de fabrico, compactação e cura, combinadas com um tempo suficiente (28 dias) para que a reacção estabilizasse.

Como os procedimentos seguidos foram idênticos aos que se empregaram nos restantes provetes, é um pouco especulativo tentar encontrar razões que justifiquem o sucedido. As condições de manipulação são, de facto, muito difíceis com tão baixa plasticidade, mas sendo iguais para todos os provetes com a razão $ACT/MC=0.75$ não há aparentemente uma explicação segura para os valores encontrados.

6.2.1.2. Tracção por Flexão

O Quadro 6.2. mostra agora os valores da resistência à tracção por flexão que foram obtidos sobre os mesmos provetes a que se referem as resistências à compressão simples indicadas acima.

Quadro 6.2. - NaOH-12M - Resistências à Tracção (MPa)

<i>Razão ACT/MC</i>	<i>Tracção por Flexão Sem Cal</i>			<i>Tracção por Flexão Com Cal</i>		
	<i>7d</i>	<i>14 d</i>	<i>28d</i>	<i>7d</i>	<i>14d</i>	<i>28d</i>
1.00	1.76	3.08	3.05	2.15	3.04	2.82
0.90	2.51	2.42	4.19	2.89	3.64	3.50
0.85	2.93	2.72	3.57	2.37	4.21	4.77
0.80	2.40	2.19	3.69	3.47	5.48	5.37
0.75	2.40	3.15	3.15	3.38	4.98	5.31

A Figura 6.4. mostra em forma gráfica as famílias de curvas relativas às composições sem e com cal que se obtém, para cada idade, quando se relacionam as resistências com as diferentes razões ACT/MC.

Os gráficos conjuntos permitem aperceber mais facilmente as diferenças entre as duas famílias de curvas. No caso das composições fabricadas sem cal verifica-se que o comportamento não está claramente definido.

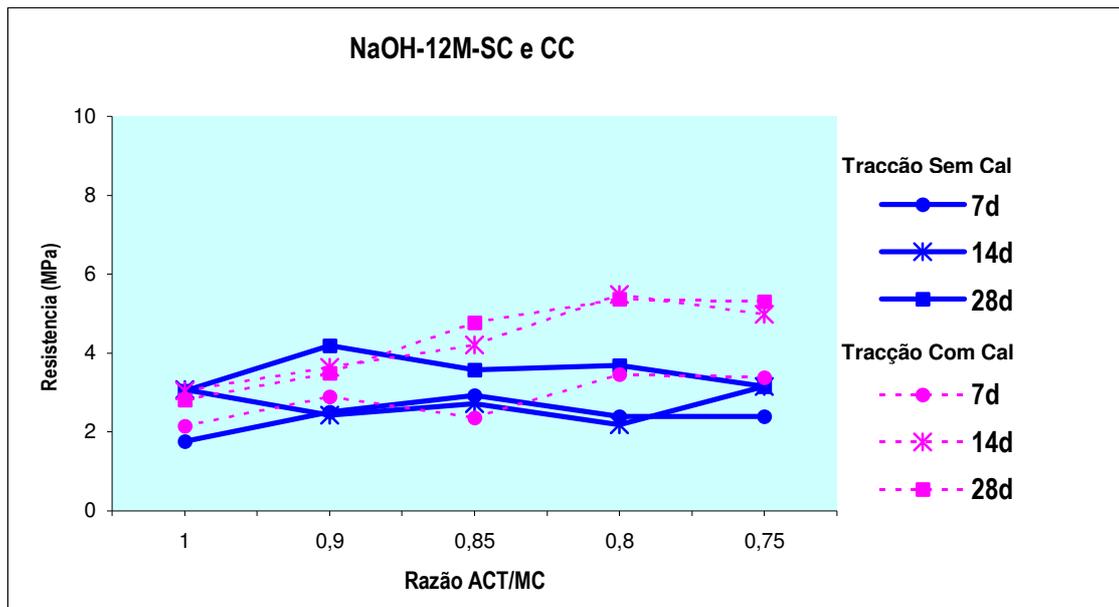


Fig. 6.4. - NaOH-12M - Tracção por Flexão em Argamassas

Em qualquer idade que seja considerada, o valor da resistência à tracção não apresenta um padrão bem definido de evolução com a diminuição da razão ACT/MC. Os valores flutuam para cima e para baixo sem qualquer definição de tendência, embora se saiba que com as tracções é difícil obter padrões claros de evolução.

O padrão obtido nos provetes fabricados com cal é mais regular, apontando claramente para o aumento das resistências quando diminui a razão ACT/MC, como de resto seria de esperar. É de referir que as curvas representativas das resistências aos 14 e 28 dias são muito semelhantes, podendo dizer-se até que são formalmente idênticas se se considerar a dispersão que é típica das resistências à tracção. Além disso, os valores obtidos nas composições em que a cal está presente tendem a ser mais elevados, situando-se à volta dos 5 MPa para as composições em que $ACT/MC \leq 0.85$, enquanto que variam entre 2 e 3 MPa no caso da ausência da cal.

A análise da forma como evoluem as resistências com a idade dos provetes para cada valor da razão ACT/MC aponta, apesar de um padrão algo confuso no

caso da família de curvas respeitantes aos provetes sem cal (Fig. 6.5.), no sentido do aumento com a idade.

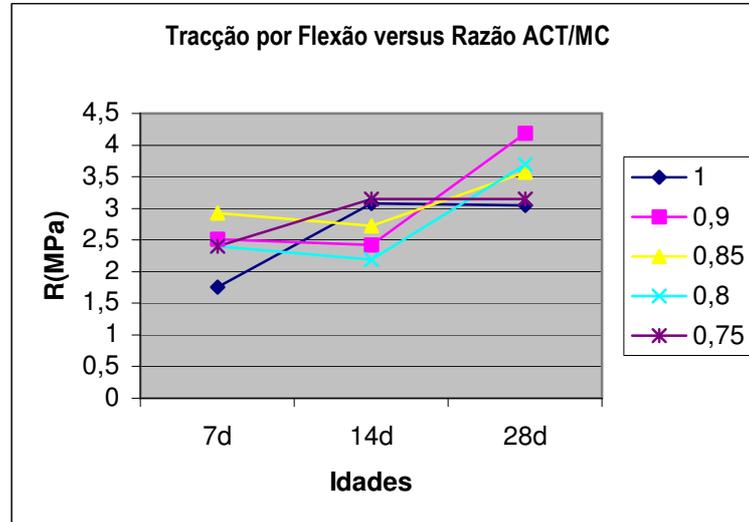


Fig. 6.5. - NaOH-12M-SC - Evolução das Resistências à Tracção com a Idade

Verificam-se, porém, quebras na idade intermédia de 14 dias. A dispersão que é normal ocorrer neste tipo de comportamento mecânico e o reduzido número de ensaios não permitem uma caracterização mais segura.

A análise das curvas apresentadas na Fig. 6.6., que dizem respeito aos provetes fabricados com incorporação de cal, é aparentemente mais regular. Não só se manifesta a evolução esperada de aumento das resistências com a idade dos provetes, com tendência na parte final para a estabilização que era suposto verificar-se, como também se regista, com pequenas discrepâncias, o aumento das resistências à tracção com a diminuição da razão ACT/MC.

As inversões pontuais que se podem detectar são muito possivelmente devidas à dispersão de valores que já atrás se referiu.

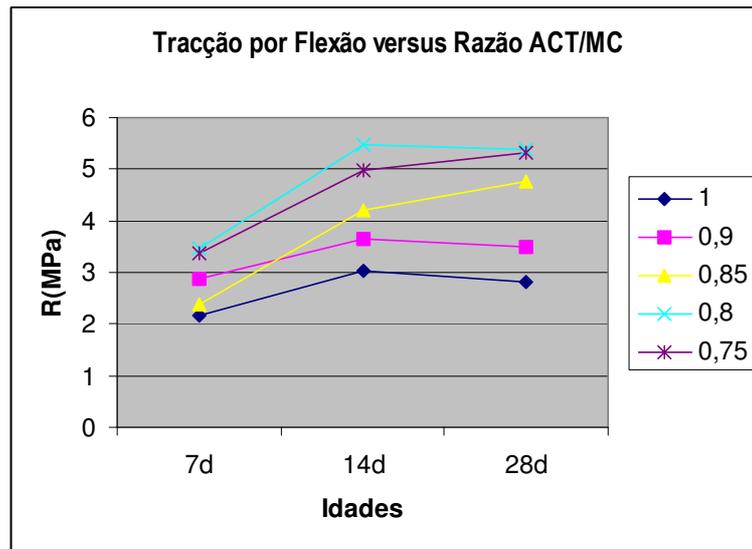


Fig. 6.6. - NaOH-12M-CC - Evolução das Resistências à Tracção com a Idade

Em termos globais, a activação de argamassas com hidróxido de sódio na concentração 12M, aponta para a obtenção de valores médios das resistências mecânicas, quer em compressão simples como em tracção, mais elevados nas composições em que se adiciona cal. Enquanto que nas composições sem cal, o valor da resistência à compressão parece estabilizar à volta dos 20 MPa e dos 3.50 MPa para a tracção, com a cal estes valores limites sobem respectivamente acima de 30 MPa e dos 5.20 MPa, o que ficará a dever-se à formação adicional de silicatos cálcicos hidratados, resultantes da reacção do activador alcalino com a cal. Alguns investigadores [15,36] apontam claramente para a formação de C-S-H (além do polímero inorgânico de estrutura silico-aluminosa) quando os precursores geopoliméricos possuem cal na sua constituição.

Com a cal, os provetes parecem também evidenciar um padrão de comportamento mais regular, aumentando com a diminuição da razão ACT/MC e as variações da idade dos provetes no momento do ensaio, apesar de se partir de uma composição (CB) relativamente elementar. Sendo a cal também um hidróxido (de cálcio), poderá admitir-se que o reforço do meio alcalino pode concorrer para dar mais homogeneidade à formação da matriz cimentícia (reacção mais

completa), sendo por isso interessante verificar o que vai acontecer quando se aumentar a concentração do activador.

6.2.2. Activador NaOH 15M

6.2.2.1. Compressão Simples

O Quadro 6.3. apresenta os valores obtidos em compressão simples quando se activam argamassas de composição CB com activador constituído por hidróxido de sódio com a concentração de 15M. Na parte esquerda do quadro estão os valores obtidos sem inclusão de cal na composição, enquanto na parte direita se mostram os resultados sobre provetes que incluem cal em substituição parcial (20%) de metacaulino.

Quadro 6.3. -NaOH-15M-Resistências à Compressão Simples (MPa)

<i>Razão ACT/MC</i>	<i>Compressão Simples Sem Cal</i>			<i>Compressão Simples Com Cal</i>		
	<i>7d</i>	<i>14 d</i>	<i>28d</i>	<i>7d</i>	<i>14d</i>	<i>28d</i>
1.00	10.29	20.00	18.86	10.29	15.83	17.10
0.90	14.34	22.03	23.49	17.47	18.38	18.54
0.85	14.77	29.68	30.35	19.08	20.84	23.08
0.80	18.51	29.70	30.17	22.36	28.43	33.58
0.75	18.93	32.62	39.27	27.82	36.60	39.83

A Fig. 6.7. apresenta os gráficos que se obtém para cada um dos dois grupos de resultados (sem e com cal) da variação das resistências à compressão simples em função da idade dos provetes e da razão ACT/MC.

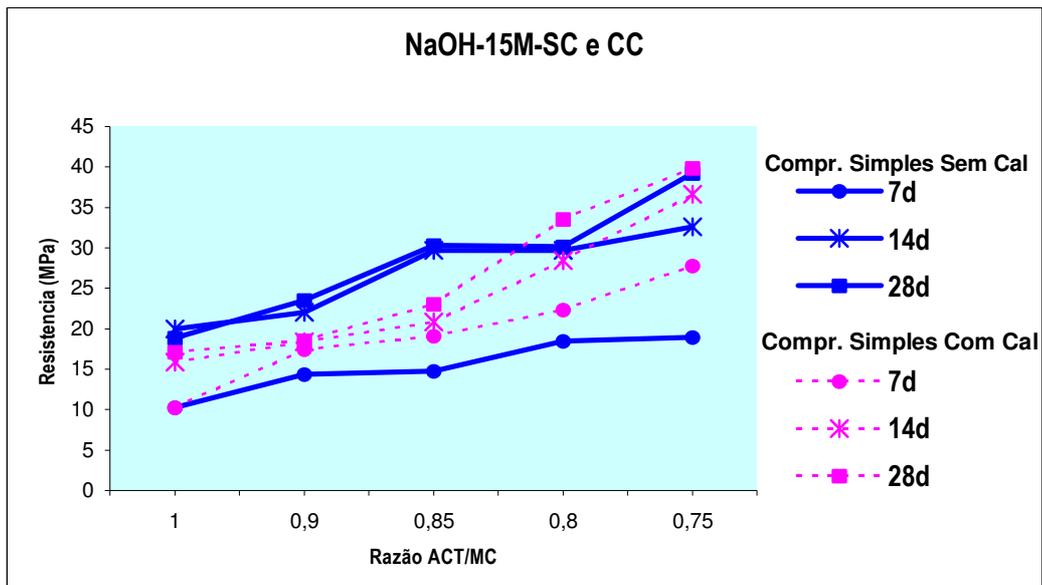


Fig. 6.7. - NaOH-15M - Compressão Simples em Argamassas

Com a concentração do activador em 15M, verifica-se um padrão mais regular no comportamento mecânico dos provetes sem cal, circunstância que também se reflecte num padrão de evolução ainda mais claro das resistências nos provetes que incluem cal na sua composição. Em ambas as situações as resistências crescem com a diminuição da razão ACT/MC, segundo uma taxa média de evolução muito semelhante. Verifica-se ainda assim uma diferente evolução com a idade dos provetes entre as duas famílias, apresentando os provetes com cal um campo de variação mais apertado.

No caso das composições sem cal verifica-se um salto importante das resistências dos 7 para os 14 dias, sendo estas muito próximas ou praticamente coincidentes com as obtidas aos 28 dias. A tendência de evolução parece indicar que as resistências poderiam aumentar caso fosse possível em termos práticos trabalhar com uma razão ACT/MC mais pequena, circunstância que também se manifesta nas composições com cal. A Fig. 6.8. mostra a forma como evolui, nas composições sem cal, a resistência à compressão com a idade dos provetes para cada valor da razão ACT/MC.

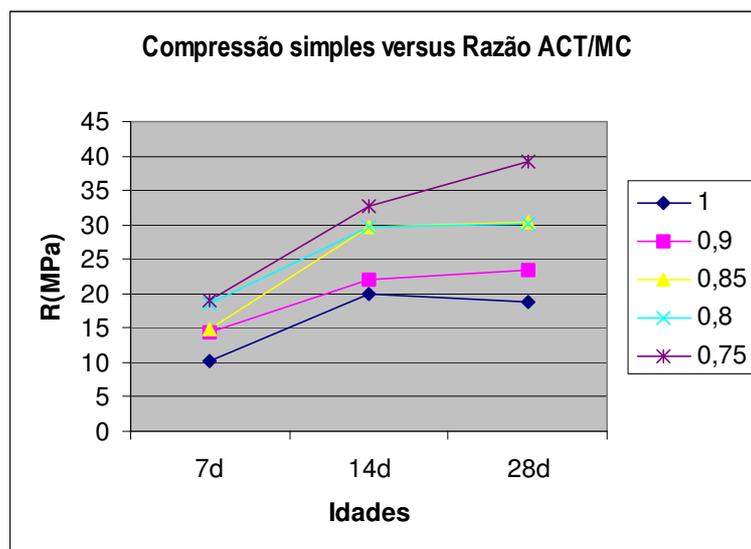


Fig. 6.8. - NaOH-15M-SC - Evolução das Resistências à Compressão com a Idade

A apreciação geral das curvas permite constatar que o andamento é mais regular do que se verificou no estudo anterior em que a concentração do activador era menor, pois é nítida a tendência para o aumento dos valores da resistência com a idade, notando-se também que a taxa de crescimento é maior inicialmente, entre os 7 e os 14 dias, diminuindo depois entre os 14 e os 28 dias com tendência para a estabilização.

A separação das curvas por cada valor da razão ACT/MC é quase completa, apesar de se dispor de um pequeno conjunto de resultados.

A Fig. 6.9., relativa aos provetes com cal na sua constituição, mostra um andamento evolutivo no sentido do aumento com a idade, evidenciando curvas com o posicionamento esperado e perfeitamente individualizadas, isto é, sem sobreposição de valores, crescendo as resistências das razões ACT/MC mais altas para as razões mais baixas.

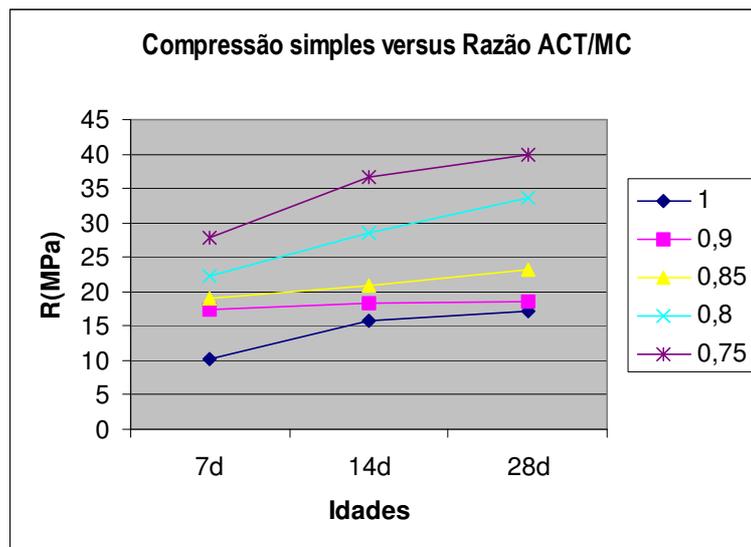


Fig. 6.9. - NaOH-15M-CC - Evolução das Resistências à Compressão com a Idade

O padrão de evolução das curvas segue, com ligeiras distorções, um mesmo modelo de ganho de resistências, com taxas de crescimento muito próximas e sem grande diferenciação entre as idades consideradas. De notar que em três das curvas a taxa de crescimento é praticamente constante dos 7 para os 14 e dos 14 para os 28 dias, verificando-se nas outras duas a tendência para diminuir a partir dos 14 dias.

6.2.2.2. Tracção por Flexão

O Quadro 6.4. apresenta as resistências à tracção por flexão, obtidas sobre os mesmos provetes de que acima se apresentam as resistências à compressão simples.

Quadro 6.4. -NaOH-15M-Resistências à Tracção (MPa)

Razão ACT/MC	Tracção por Flexão Sem Cal			Tracção por Flexão Com Cal		
	7d	14 d	28d	7d	14d	28d
1.00	2.27	3.56	3.55	2.71	3.06	3.05
0.90	2.16	4.76	5.44	3.66	3.16	3.15
0.85	2.88	5.08	5.37	3.82	3.13	3.61
0.80	3.10	5.04	6.01	4.47	5.14	4.27
0.75	4.06	6.20	6.98	4.55	5.60	6.24

A Fig. 6.10. apresenta as duas famílias de curvas representativas que se obtém com os dados constantes do quadro.

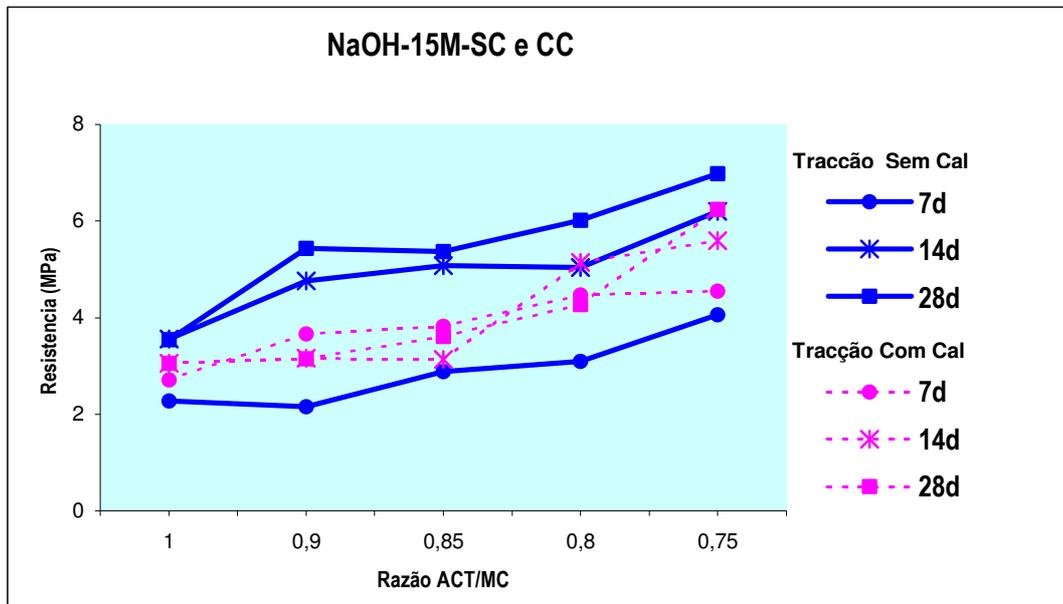


Fig. 6.10. - NaOH-15M-Tracção por Flexão em Argamassas

Como é visível, há uma tendência clara para o crescimento das resistências com a diminuição da razão ACT/MC, tanto para as composições sem cal como naquelas em que a cal está presente. Do mesmo modo que nas resistências à compressão, regista-se nas primeiras um salto considerável entre as resistências aos 7 e aos 14 dias, sendo estas depois mais próximas das resistências aos 28 dias, embora inferiores.

Por seu turno, as resistências das composições com cal, embora apontem para o aumento com a diminuição da dosagem de activador, evoluem dentro de uma gama de valores mais apertada. Por essa razão é possível encontrar valores aos 7 dias que são superiores aos correspondentes aos 14 e mesmo aos 28 dias.

Ambas as famílias de curvas apresentam ainda tendência para registarem aumentos na eventualidade de ser possível diminuir ainda mais a razão ACT/MC.

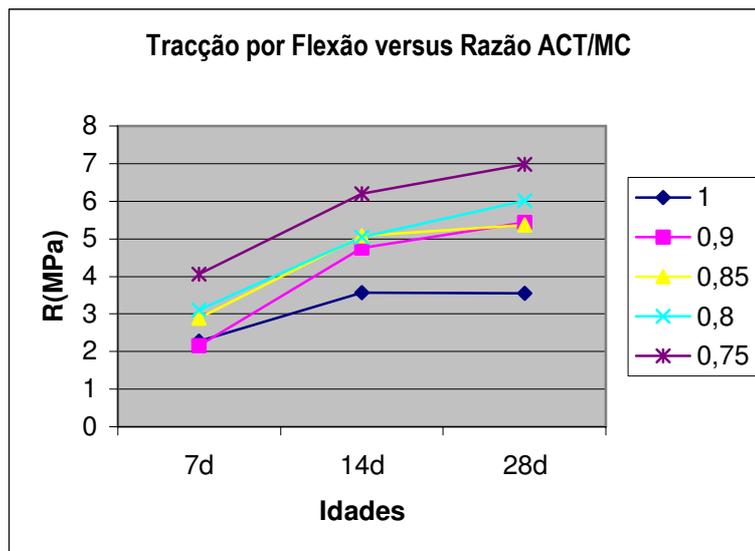


Fig. 6.11. - NaOH-15M-SC - Evolução das Resistências à Tracção com a Idade

A evolução das resistências à tracção com a idade para cada valor da razão ACT/MC está representada na Fig. 6.11. para as composições sem cal. A evolução é nítida no sentido do aumento com a idade e com marcada tendência para o abrandamento ao alcançarem os 28 dias como se verifica nos produtos de CPN. Apenas com pequenos desvios pontuais, regista-se a regularidade da evolução das resistências com o tempo, pois as curvas são sensivelmente paralelas, o que significa que as taxas de crescimento entre as diferentes idades são muito próximas.

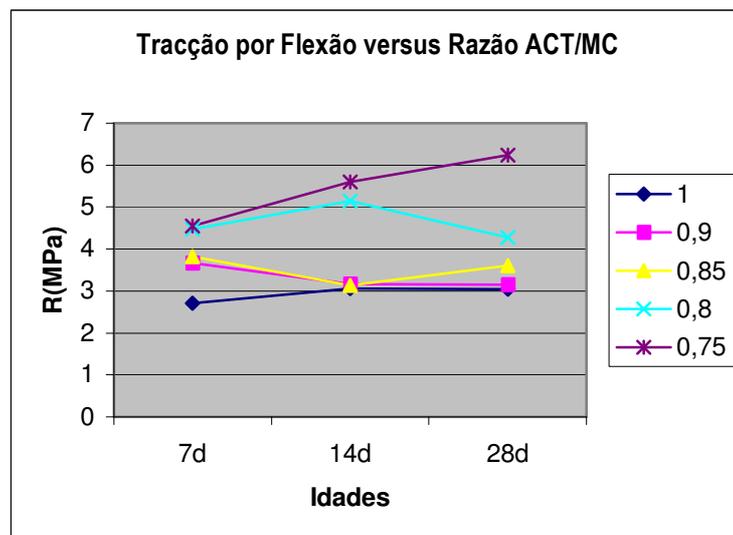


Fig. 6.12. - NaOH-15M-CC - Evolução das Resistências à Tracção com a Idade

Contrariamente ao que se tem registado nas situações estudadas anteriormente sobre provetes com cal na sua composição, as curvas representativas da evolução das resistências à tracção (Fig. 6.12.) não apresentam um padrão de evolução com a idade muito bem definido. Apenas as curvas relativas às razões mais alta e mais baixa se desenvolvem com o sentido esperado. Nas razões intermédias verifica-se um padrão confuso com valores aos 14 e também aos 28 dias, inferiores aos dos 7 dias. Os mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento de resistências à tracção são muito susceptíveis de flutuações deste tipo, sendo por isso irrelevante tentar encontrar alguma explicação para o ocorrido.

Em termos globais, pode dizer-se a utilização de uma maior concentração de activador (15M) leva a que nas composições sem cal se verifique maior regularidade e mesmo valores mais altos das resistências, quer em compressão, quer em tracção, em relação às composições com cal. Enquanto na situação anterior (concentração 12M) as composições sem cal apresentavam um comportamento mal definido, com padrões de evolução um pouco erráticos, contrastando com as composições em que a cal foi considerada em que se obteve maior regularidade no ganho de resistências, agora a ausência de cal não se manifesta da mesma maneira, alcançando-se uma definição mais clara do comportamento do material geopolimérico em que as resistências à compressão e mesmo à tracção crescem com a idade e com a diminuição da razão ACT/MC como se verifica em termos genéricos nos produtos fabricados com CPN.

Por esta razão, e em conjugação com o que se disse a propósito dos resultados obtidos com o activador simples com a concentração a 12M, parece ser importante garantir aos precursores geopoliméricos um ambiente suficientemente alcalino, em termos de $[OH^-]$, por forma a conseguir-se, dentro do tempo considerado, um maior grau de reacção. Os resultados parecem sugerir a

necessidade de se atingir um determinado limiar de alcalinidade para assegurar que os fenómenos reactivos se desencadeiem e se consumem. Se esse limiar é garantido pela concentração do activador ou pela acção conjunta da cal parece ser indiferente. Nas composições sem cal parece ser necessária uma maior concentração de activador, enquanto que nas composições com a presença de cal a concentração do activador pode ser mais baixa, pois o hidróxido de cálcio complementa o ambiente alcalino necessário à efectivação da reacção de geopolimerização.

Estes resultados concordam de alguma forma com os trabalhos de Palomo [49]. Concretamente, este autor afirma que a concentração do activador necessária para provocar a geopolimerização de compostos com presença significativa de cal é baixa a média, enquanto que nos compostos em que a percentagem de cal é muito baixa ou nula se tem de recorrer a uma elevada concentração no activador. Portanto, a concentração 12M poderá não ser totalmente suficiente no caso de composições sem cal, enquanto que já produz melhores resultados quando a cal está presente.

Por outro lado, o mesmo autor refere que as concentrações demasiado elevadas podem dificultar a mobilidade dos aniões OH^- , prejudicar a conclusão dos fenómenos reactivos, podendo inclusivamente levar a uma diminuição das resistências. Portanto, se no caso das composições sem cal a concentração 15M conduz a resultados elevados e bem definidos do ponto de vista reactivo, já se verifica alguma instabilidade e perturbação no domínio das misturas de metacaulino e cal, como se verificou.

Convém entretanto referir alguns aspectos operacionais encontrados ao longo destes ensaios. A cal tem um efeito muito sensível ao nível do acelerar da presa das argamassas, a tal ponto que se torna necessária uma grande atenção às condições de mistura (tempo de amassadura e atrito interno entre os agregados),

pois qualquer pequena elevação da temperatura pode levar ao endurecimento quase imediato da pasta, tornando inviável a sua colocação no molde. Este efeito é tanto mais sensível quanto menor for a razão ACT/MC.

Verifica-se também que as pastas se tornam mais espessas e difíceis de trabalhar, circunstância que poderá afectar a obtenção de boas compacidades pela maior dificuldade de libertação das bolhas de ar. À medida que a razão ACT/MC vai diminuindo, verifica-se também uma maior dificuldade na mistura adequada de todos os componentes.

Nos provetes na concentração 15M com cal, em que aparentemente é excessivo o ambiente alcalino, nota-se, com o passar do tempo, a libertação à superfície de profusos sais brancos de carbonato de sódio. O ião Na^+ em excesso, não retido electricamente na estrutura do alumino-silicato geopolimérico, parece assomar à superfície do provete aonde se combina com o CO_2 atmosférico dando origem a carbonato de sódio. Este efeito tem sido notado por vários autores [80].

6.2.3. Activador NaOH 18M

Em relação a esta última fase de utilização de activadores simples não se fizeram ensaios com cal. De facto, a presença da cal não pareceu dar lugar a aumentos das resistências mecânicas, agravando também as condições de fabrico, tornando as pastas muito espessas.

6.2.3.1. Compressão Simples

Os resultados das resistências à compressão simples obtidos nas 3 idades consideradas e para as composições com diferentes razões ACT/MC, com a concentração de Hidróxido de Sódio de 18M, são apresentados no Quadro 6.5.

Quadro 6.5. - NaOH-18M-Resistências à Compressão

Razão ACT/MC	Compressão Simples Sem Cal		
	7d	14d	28d
1.00	14.08	16.73	17.23
0.90	15.94	27.62	22.17
0.85	18.60	28.35	26.71
0.80	20.42	36.18	34.39
0.75	29.28	40.05	38.03

Também a Fig. 6.13. mostra sob forma gráfica a variação das resistências à compressão simples com a razão ACT/MC e a idade dos provetes na data do ensaio.

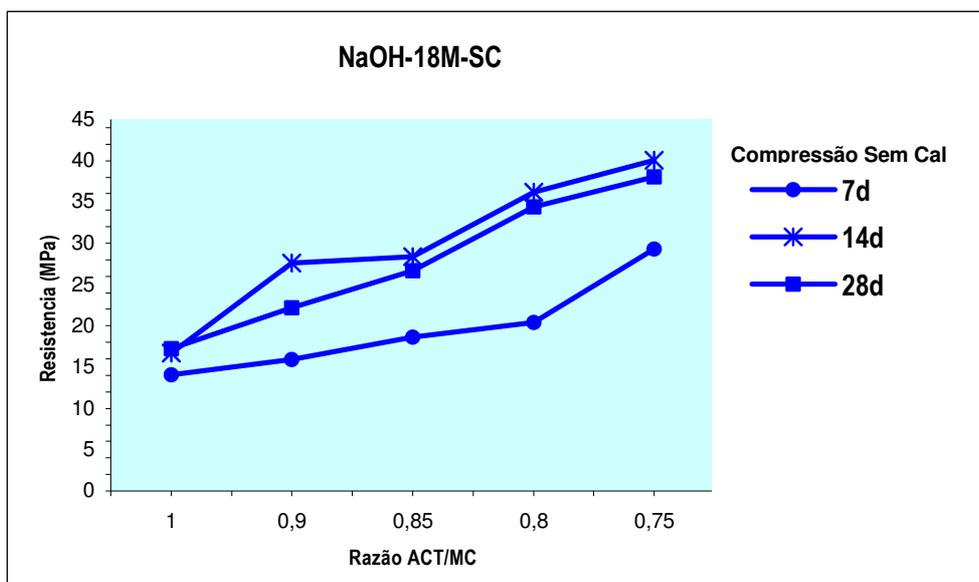


Fig. 6.13. - NaOH-18M - Compressão Simples em Argamassas

Como é visível, o padrão de evolução das resistências com a diminuição da razão ACT/MC é bem definido, apontando para o aumento. O nível de resultados é comparável ao dos obtidos com a concentração de 15M, verificando-se, do mesmo modo, um salto significativo de resistências dos 7 para os 14, sendo nesta idade os valores muito próximos dos que são alcançados aos 28 dias.

A evolução dos valores das resistências à compressão com a idade dentro de cada razão ACT/MC está representada na Fig. 6.14. O tipo de curvas é do mesmo tipo, com taxas de crescimento de resistências mais elevadas dos 7 para os 14 dias, verificando-se depois uma tendência para a diminuição ao passar para os 28 dias, circunstância que está de acordo com as observações de Palomo atrás referidas sobre a possibilidade de quebra das resistências mecânicas devido ao excesso de presença de hidroxilos OH^- .

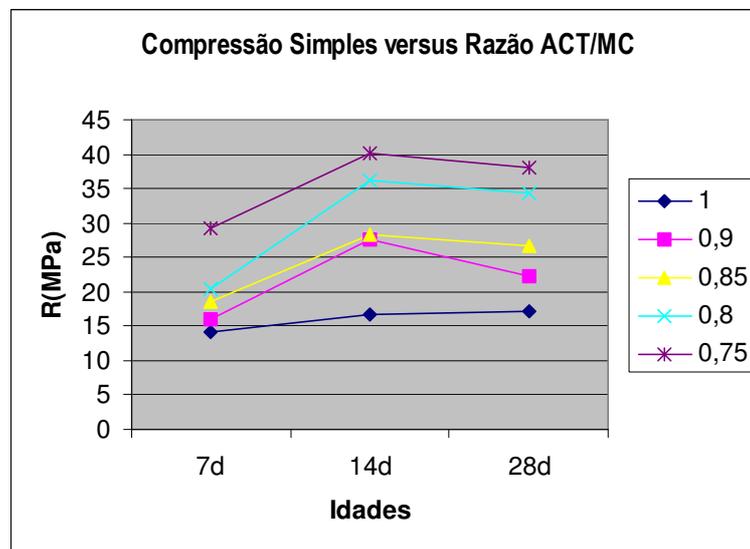


Fig. 6.14. - NaOH-18M-SC Evolução das Resistências à Compressão com a Idade

É de referir que as curvas parecem definir com alguma clareza um campo de variação das resistências sem sobreposição de valores, entre as diferentes idades.

6.2.3.2. Tracção por Flexão

Os valores obtidos da resistência à tracção estão indicados no Quadro 6.6., estando a parte gráfica representada na Fig. 6.15.

Quadro 6.6. - NaOH-18M-Resistências à Tracção

Razão ACT/MC	Tracção por Flexão Sem Cal		
	7d	14d	28d
1.00	2.29	2.93	3.46
0.90	3.16	4.63	3.82
0.85	3.11	5.97	4.79
0.80	4.19	6.20	5.41
0.75	4.12	6.73	5.94

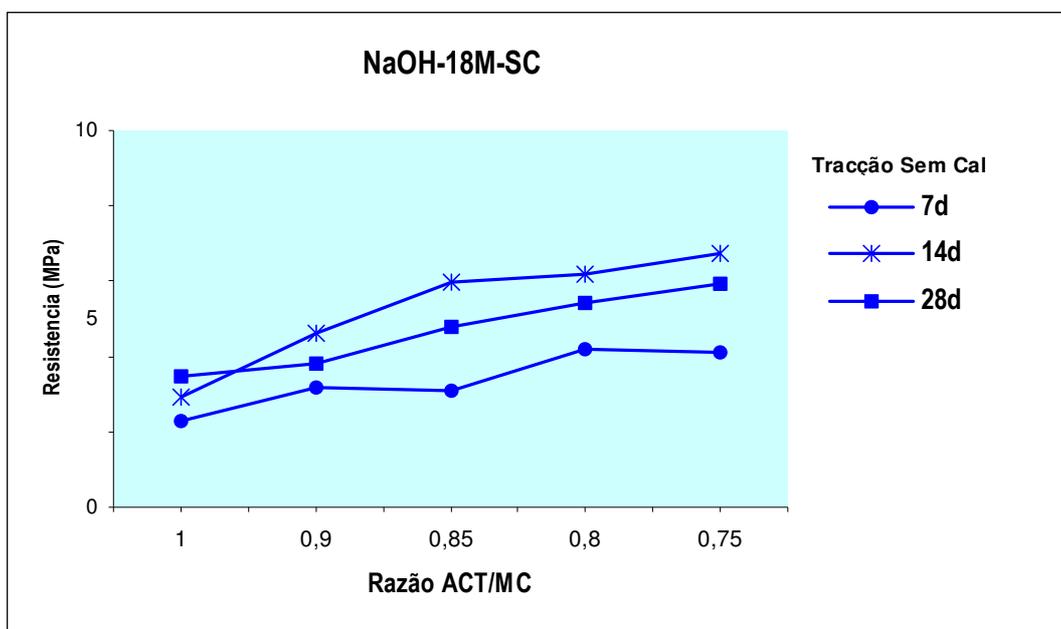


Fig. 6.15. - NaOH-18M - Tracção por Flexão em Argamassas

É marcada a tendência que as resistências à tracção mostram para aumentar com a diminuição da razão ACT/MC, sendo de referir que as taxas médias de evolução são muito semelhantes nas diferentes idades. Em confirmação da perturbação possivelmente criada no processo pelo excesso de OH^- , verifica-se que as resistências aos 14 dias são quase sempre superiores aos correspondentes valores das resistências aos 28 dias.

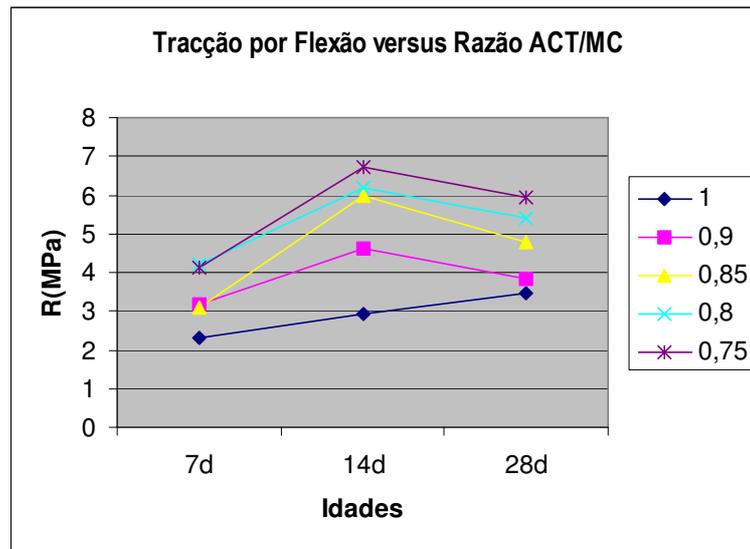


Fig. 6.16. - NaOH-18M-SC-Evolução das Resistências à Tracção com a Idade

A evolução das resistências à tracção mostra curiosamente um padrão muito próximo daquele que se encontrou nas resistências à compressão, com taxas de ganho elevadas na passagem dos 7 para os 14 dias e depois com acentuado declínio das resistências quando se passa para os 28 dias. A excepção, como no caso da compressão, é a da curva representativa da razão ACT/MC mais alta que aponta para uma evolução positiva constante, o que também se verificou no caso em referência.

As curvas definem também campos de evolução dos resultados praticamente sem sobreposição de valores, sendo de realçar que para $ACT/MC > 1$, as curvas são praticamente paralelas, com idênticas taxas de crescimento e de diminuição das resistências.

Numa apreciação global aos resultados obtidos com a activação do metacaulino recorrendo a uma concentração de 18M de hidróxido de sódio, verifica-se que se obtém quer em compressão como em tracção um nível de resistências comparável ao que se registou na concentração de 15M, embora se registre uma tendência para degradação das resistências na passagem dos 14 para

os 28 dias. Esta situação anómala pode ficar a dever-se ao excesso de hidroxilos numa fase determinada do processo de activação que podem de algum modo perturbar ou mesmo afectar alguns dos fenómenos reactivos. A activação alcalina é um processo complexo que envolve uma multiplicidade de factores, cuja influência nas características do produto final é ainda mal conhecida, mas é interessante constatar que parece existir, em face da constituição química dos precursores geopoliméricos, uma concentração precisa do ambiente alcalino em que os fenómenos se processam, que conduzirá aos melhores resultados.

6.2.4. Estudo das Relações entre as Resistências à Tracção e à Compressão

Foi também apurada, para cada uma das concentrações (12, 15 e 18M), a razão entre as resistências à tracção e à compressão simples, para as mesmas idades e composições. Estas razões espelham de algum modo o tipo de ligação que o ligante desenvolve com os agregados, sendo de esperar por via da ligação química que parece verificar-se nos geopolímeros que se obtenham valores mais altos dos que se conseguem nos produtos de cimento Portland.

Os resultados estão seriados nos Quadros 6.7. e 6.8., respectivamente para as misturas sem e com adição de cal.

Quadro 6.7. - Razões Rt/Rc (sem cal)

	<i>Idades</i>	<i>Comp.0</i>	<i>Comp.1</i>	<i>Comp.2</i>	<i>Comp.3</i>	<i>Comp.4</i>
12M	7 dias	0.21	0.20	0.20	0.14	0.13
	14 dias	0.23	0.17	0.18	0.16	0.16
	28 dias	0.16	0.18	0.18	0.18	0.13
15M	7 dias	0.22	0.15	0.20	0.17	0.22
	14 dias	0.18	0.22	0.17	0.17	0.19
	28 dias	0.19	0.23	0.17	0.20	0.18
18M	7 dias	0.16	0.20	0.17	0.21	0.14
	14 dias	0.18	0.17	0.21	0.17	0.17
	28 dias	0.20	0.17	0.18	0.16	0.16

O valor médio das razões é 0.18.

Quadro 6.8. - Razões Rt/Rc (com cal)

	<i>Idades</i>	<i>Comp.0</i>	<i>Comp.1</i>	<i>Comp.2</i>	<i>Comp.3</i>	<i>Comp.4</i>
12M	7 dias	0.19	0.24	0.20	0.18	0.14
	14 dias	0.21	0.21	0.18	0.18	0.17
	28 dias	0.19	0.18	0.18	0.18	0.11
15M	7 dias	0.26	0.20	0.20	0.20	0.16
	14 dias	0.19	0.17	0.15	0.18	0.15
	28 dias	0.18	0.17	0.16	0.13	0.16

A média das razões é também de 18 como encontrado nos provetes sem cal. Estes valores estão acima dos que são correntes no cimento Portland, que como se sabe se situam entre os 10 e 15%. É preciso, porém, ter em atenção que os valores aqui obtidos sobre os geopolímeros dizem respeito a um conjunto de composições de ensaio em que as condições de activação não são homogéneas. Ou seja, se forem retiradas as composições em que as resistências mecânicas sejam menores ou o comportamento se revele afectado por deficientes condições de activação (como por exemplo, as composições com a concentração de 15M sem cal), a razão média entre as resistências à tracção e à compressão sobe acima de 0.19, valor que se pode considerar apreciável.

6.2.5. Efeito da Substituição Parcial de Metacaulino por Cal

Pareceu importante verificar em que medida a percentagem de substituição de cal afecta as resistências finais dos geopolímeros em que ela é considerada. A percentagem de 20% considerada nos estudos atrás apresentados teve como principal efeito melhorar as resistências quando se usou um activador de mais baixa concentração (12M). A presença da cal também conferiu maior rapidez nos processos de presa, o que em certas condições poderá ter particular interesse. A cal poderá compensar o eventual déficit de OH^- do activador, contribuindo assim para melhor efectivação da reacção de geopolimerização.

Consequentemente, foram fabricados e ensaiados provetes, quer em compressão quer em tracção, em que se procedeu à substituição decrescente de metacaulino por cal em percentagens de 15, 10 e 5% sucessivamente. A composição adoptada foi a mesma, a CB, procedendo-se à activação com o hidróxido de sódio nas concentrações de 12 e 15M. Os Quadros 6.9. e 6.10. apresentam os resultados obtidos aos 28 dias em compressão simples para as duas concentrações, na composição com a razão ACT/MC = 0.80, mostrando-se também em cada caso os valores alcançados para as percentagens de 20% e 0%(sem cal).

Quadro 6.9. – NaOH-12M-Resistências à Compressão Simples (MPa)

Concentração do Activador	Percentagem de Substituição de Metacaulino por Cal				
	0% (')	5%('')	10%('')	15%('')	20%(')
12M	20.05	21.37	24.12	26.54	30.57
15M	30.17	30.01	33.14	32.70	33.58

(') média de 3 provetes ('') média de 4 provetes

A Fig. 6.17. mostra em gráfico a evolução das resistências em compressão, em função das diferentes percentagens de substituição de metacaulino por cal e para cada uma das concentrações usadas.

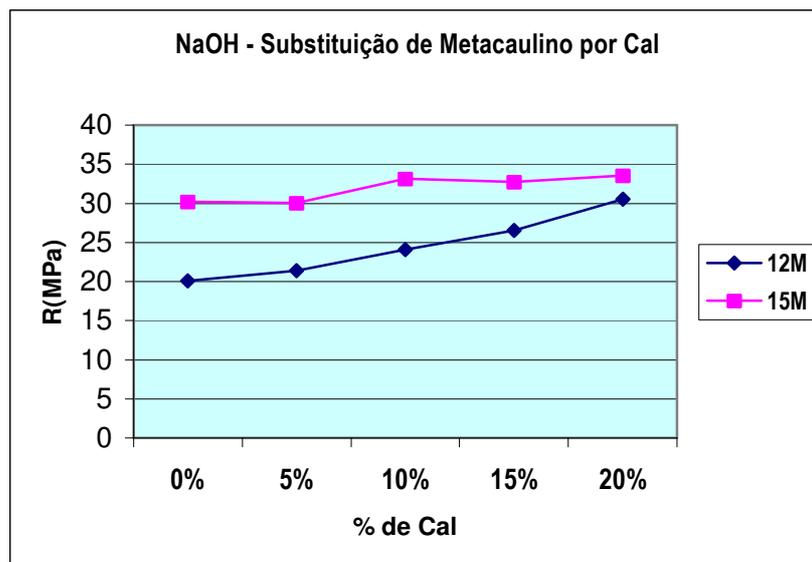


Fig. 6.17. – Compressão Simples - Diferentes % de Substituição de Metacaulino por Cal

Enquanto que na concentração 12M se nota uma subida gradual e bem definida das resistências à compressão com a crescente percentagem de cal, na concentração 15M, embora se note um aumento global entre a situação de não presença de cal (0%) e as crescentes percentagens de substituição, a evolução segue um padrão um pouco irregular.

Em relação às resistências à tracção, encontram-se resumidos no Quadro 6.10. os valores obtidos também na mesma data e para as mesmas composições.

Quadro 6.10. – NaOH-12M-Resistências à Tracção por Flexão (MPa)

Concentração do Activador	Percentagem de Substituição de Metacaulino por Cal				
	0% (')	5%('')	10%('')	15%('')	20%(')
12M	3.69	4.03	4.41	4.83	5.37
15M	6.01	5.71	5.64	5.16	4.27

(') média de 3 provetes (") média de 4 provetes

A Fig. 6.18. apresenta as curvas representativas da evolução das resistências de tracção agora determinadas.

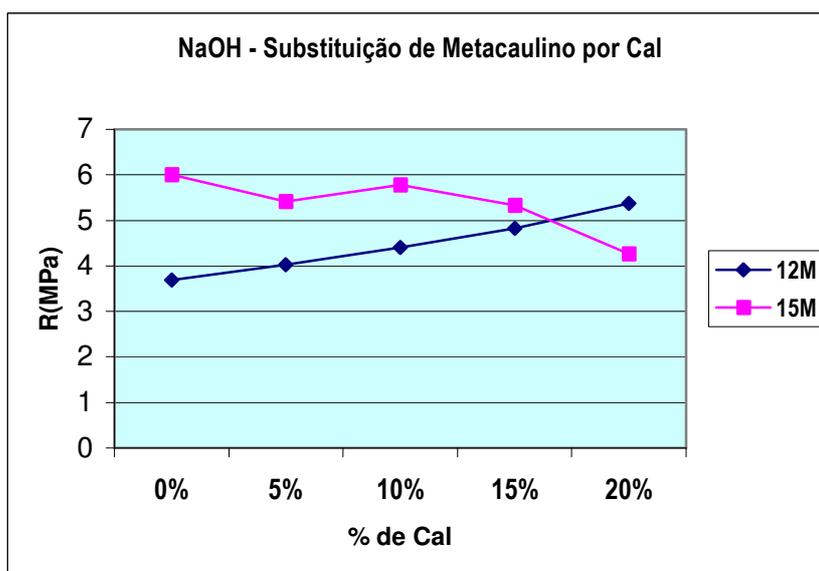


Fig. 6.18. – Tracção por Flexão - Diferentes % de Substituição de Metacaulino por Cal

A curva que define a evolução das resistências à tracção para a concentração 12M tem o mesmo andamento regular que a curva da compressão registou. Aliás, a inclinação média das duas curvas é praticamente a mesma, significando serem muito próximas as taxas médias de ganho de resistência. Já no que diz respeito à concentração de 15M, manifesta-se um padrão um pouco irregular, embora com tendência para a diminuição das tracções com a percentagem crescente de cal.

Foram registadas durante a fase de fabrico facilidades crescentes com a manipulação das pastas à medida que a taxa de substituição ia diminuindo. Pelo contrário, com a diminuição da taxa de substituição verificou-se um aumento significativo do tempo de presa. No Quadro 5.11. são indicados os tempos de presa (início e fim) obtidos nesta análise.

Em termos conjuntos, parece confirmar-se que nos compostos precursores que contenham cal na sua composição, a concentração do activador simples que possa ser usado para a activação alcalina, deve ter uma concentração mais baixa do que naqueles compostos que não disponham de cal na sua constituição. Em relação aos resultados obtidos, que estão necessariamente relacionados com a composição química do caulino usado, parece que a concentração do activador não deverá subir além de 12M. A ausência de cal nas composições (ou na constituição química do precursor geopolimérico) leva a que a concentração do activador tenha de subir se se pretendem obter melhores resultados mecânicos e maior regularidade de comportamento.

6.3. Acção da Concentração do Activador

É agora feita com algum detalhe a comparação entre os resultados à compressão e à tracção das composições sem e com cal, em função da concentração do activador e da sua presença na reacção definida pela razão

ACT/MC. Os dados de partida são os mesmos que atrás, mas a forma como se apresentam põe em destaque a acção específica do activador.

Os gráficos das Figs. 6.19., 6.20. e 6.21. dizem respeito às resistências à compressão simples em provetes sem cal, enquanto que os gráficos seguintes (Figs. 6.22., 6.23. e 6.24.) se referem às resistências em tracção por flexão nas mesmas composições.

Os gráficos são representados na mesma escala, o que permite perceber a evolução das resistências de uma idade para a outra. Parece claro que numa fase mais precoce as resistências à compressão evoluem mais rapidamente com a concentração, registando-se os maiores valores com a concentração de 18M. Porém, aos 28 dias, os valores obtidos com a concentração de 15M já se situam ao mesmo nível e mesmo acima dos correspondentes da concentração 18M.

Possivelmente devido à insuficiência de hidroxilos $[OH^-]$, os resultados na concentração 12M mantêm uma evolução mais lenta, não se aproximando da concentração 15M senão na idade dos 7 dias.

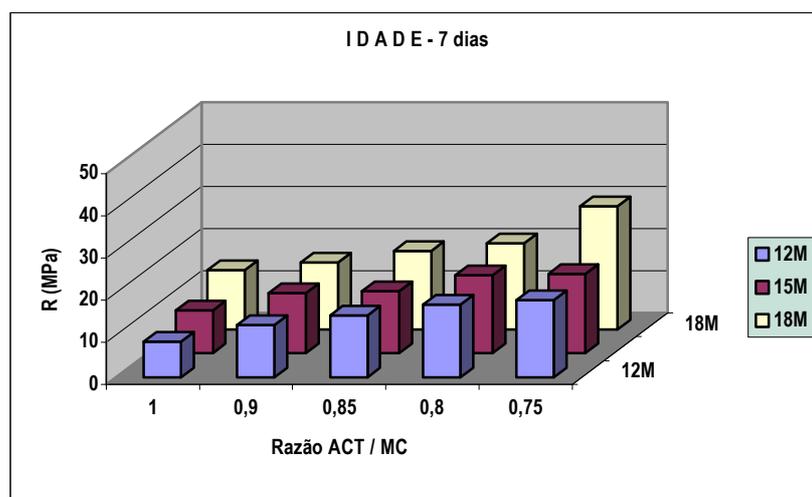


Fig. 6.19. - 7 dias - Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC

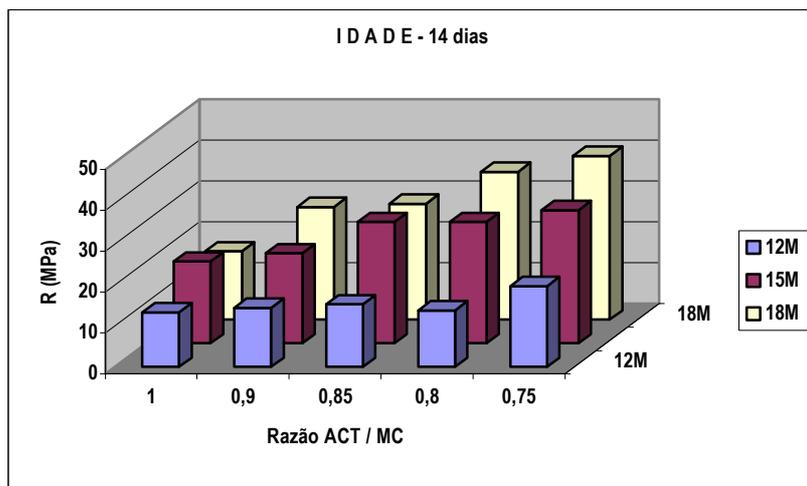


Fig. 6.20. - 14 dias - Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC

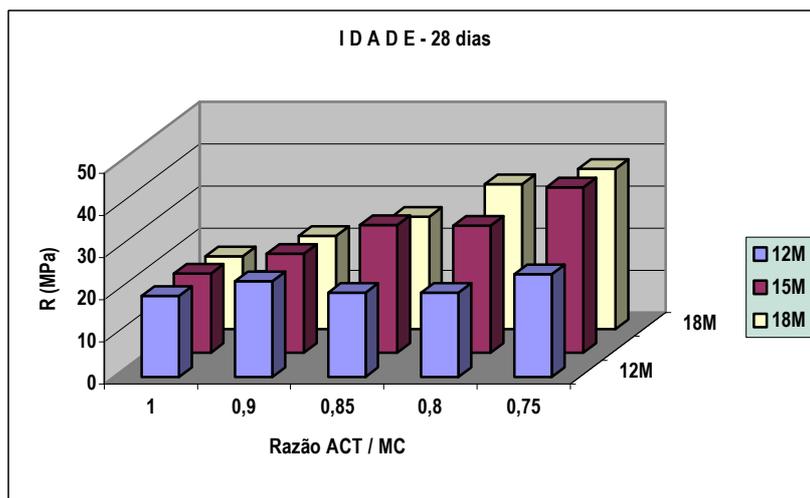


Fig. 6.21. - 28 dias - Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC

Analisando o desempenho dos provetes em tracção obtidos nas mesmas condições, pode ver-se que o padrão de evolução é semelhante, isto é, nas primeiras idades a concentração de 18M conduz aos melhores resultados, enquanto que aos 28 dias os resultados obtidos com a concentração 15M se apresentam como os melhores. Os resultados obtido com a concentração 12M mostram alguma irregularidade, já detectada nos estudos anteriores.

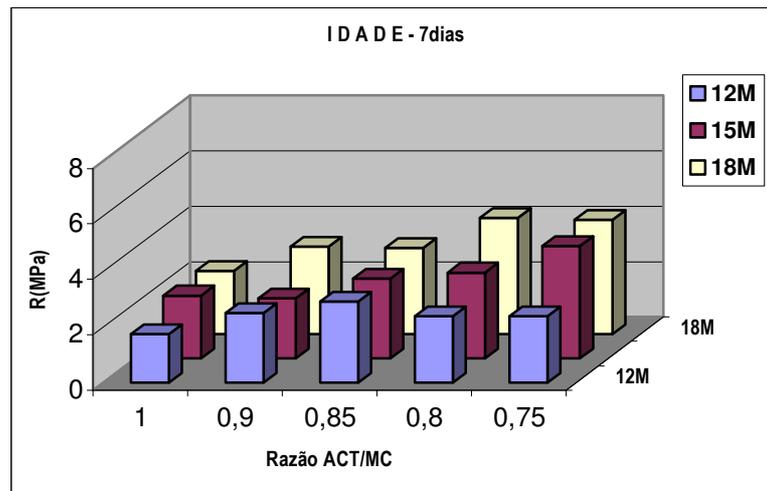


Fig. 6.22. - 7dias - Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC

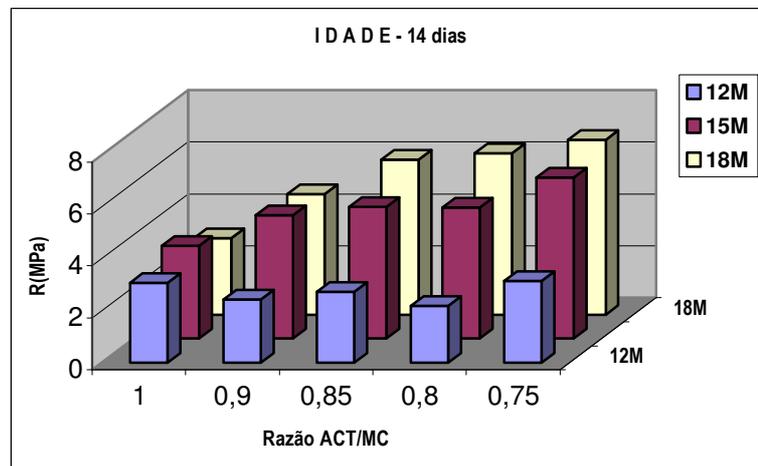


Fig. 6.23. - 14dias - Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC

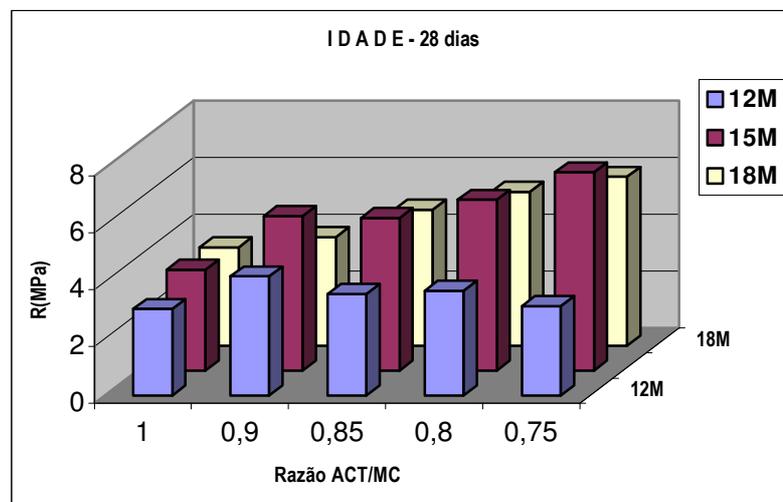


Fig. 6.24. - 28dias - Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC

São seguidamente apresentados os gráficos de conjunto para as composições com presença de cal, que apenas dizem respeito às concentrações de 12 e 15M.

Continua a verificar-se o aumento das resistências com a idade a que foram testados os provetes de argamassa.

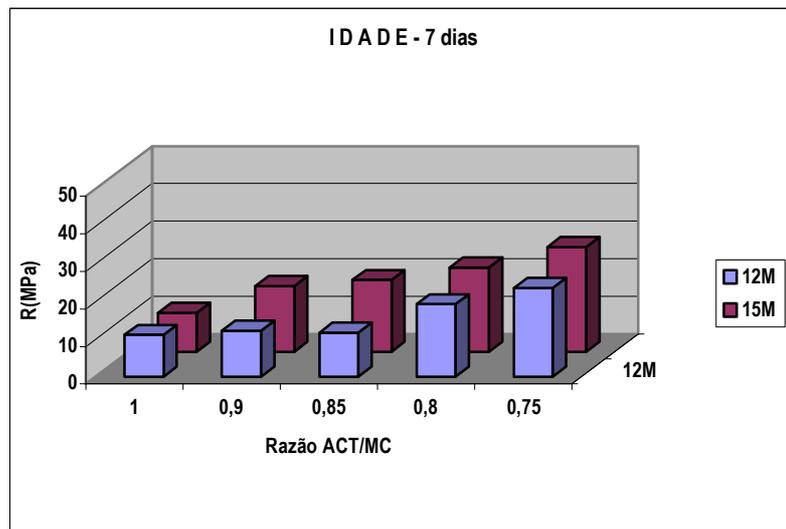


Fig. 6.25. - 7 dias - Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC

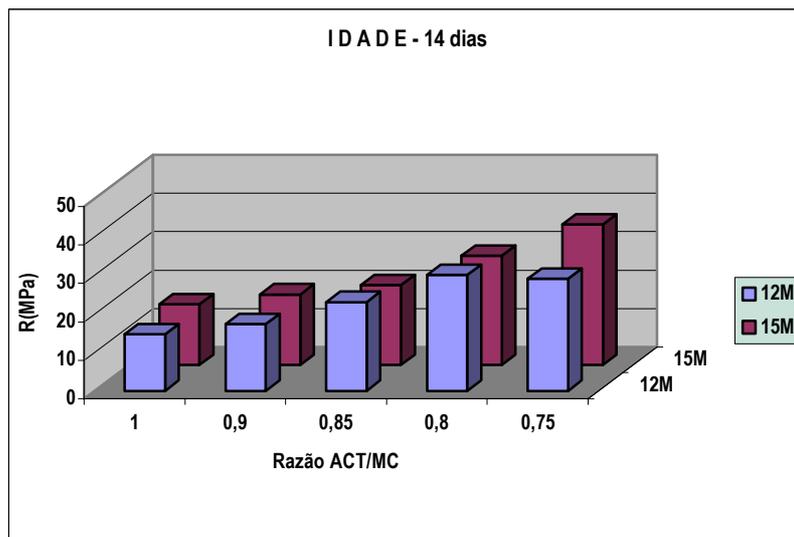


Fig. 6.26.- 14 dias - Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC

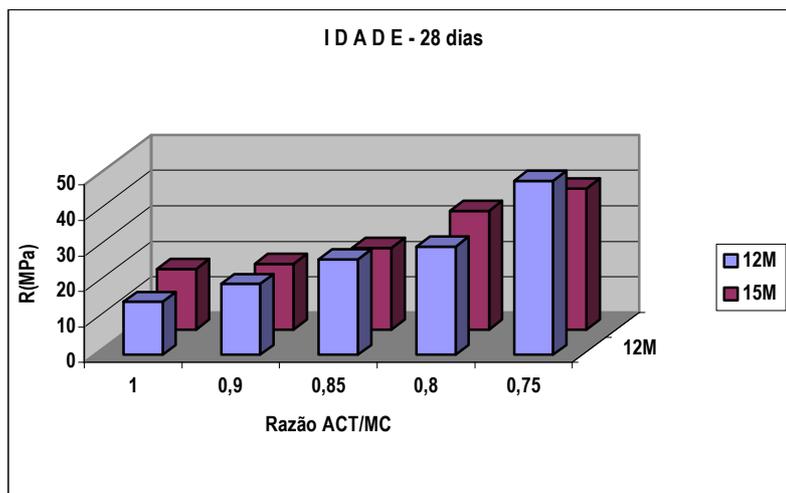


Fig. 6.27. - 28 dias -- Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC

Porém, os resultados obtidos com a concentração 12M, se nas idades de 7 e 14 dias se mantêm quase sempre abaixo dos correspondentes valores na concentração 15M, parecem na idade de 28 dias ultrapassá-los em alguns casos. O padrão de evolução com a razão ACT/MC é também mais regular, isto é, sem grandes flutuações, muito semelhante ao que sucede nos valores da concentração 15M.

Em tracção, o comportamento conjunto das duas concentrações estudadas com adição de cal está patente nas Figuras 6.28., 6.29. e 6.30.

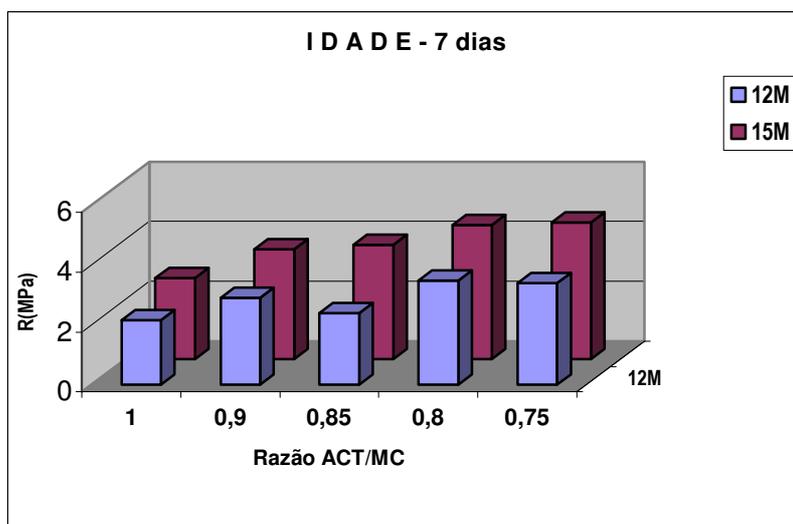


Fig. 6.28.- 7dias - Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC

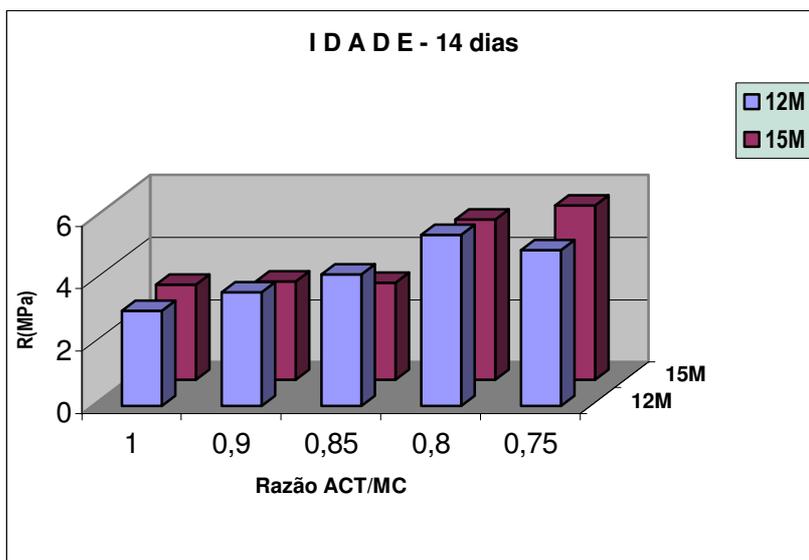


Fig. 6.29.- 14dias - Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC

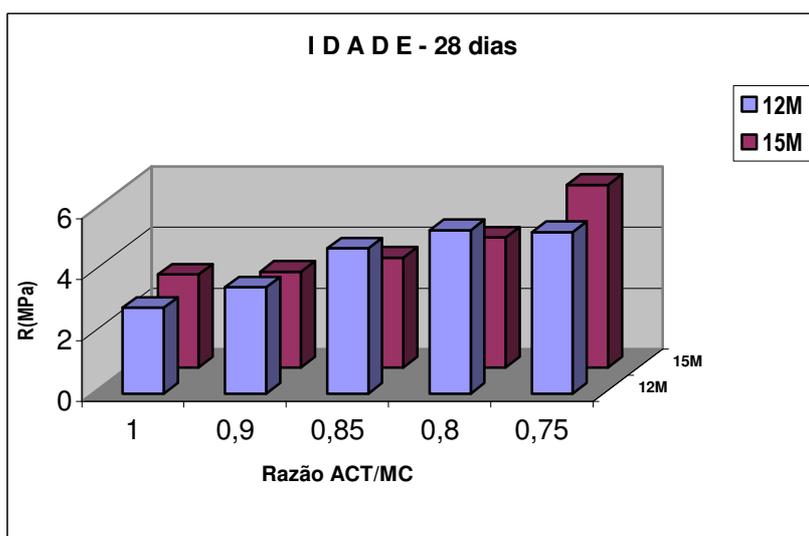


Fig. 6.30. - 28dias - Variação das Resistências com a Concentração e a Razão ACT/MC

Os valores da concentração 12M apresentam-se menos regulares, com algumas variações para cima e para baixo, que os da concentração 15M, e se na idade de 7 dias são nitidamente inferiores a estes, nas idades de 14 e 28 mostram valores similares.

6.4. Evolução das Resistências em Idades mais Avançadas

Como se disse no princípio do capítulo, a análise da evolução das resistências em compressão e em tracção é apresentada em separado. O número de provetes ensaiados foi substancialmente menor e para apreciar o progresso com o tempo nem todos foram testados nas mesmas idades. Nalguns casos os provetes foram testados aos 60 dias, noutros aos 90 e finalmente alguns ainda aos 120 dias, tentando assim perceber-se se poderia verificar-se alguma evolução ao longo desse tempo.

Como se irá ver, os resultados são globalmente expressivos na medida em que parecem confirmar a ideia de que a reacção de activação alcalina se conclui num tempo relativamente curto, não progredindo no tempo o ganho de resistências quer em compressão como em tracção.

6.4.1. Resistências Mecânicas em Composições sem Cal

O Quadro 6.11. apresenta os resultados em compressão e tracção de provetes fabricados com 2 concentrações de hidróxido de sódio e as 5 composições resultantes de diferentes razões ACT/MC, ensaiados nas datas indicadas. Na maioria dos casos só se dispõe de um resultado. Estão assinalados os resultados que são a média de dois provetes.

Quadro 6.11. - Resistências em Idades Avançadas

ACT/MC	12 M				15M			
	Compr. Simples		Tracção		Compr. Simples		Tracção	
	90d	120d	90d	120d	90d	120d	90d	120d
1.00	19.87 ⁽²⁾	-	3.17 ⁽²⁾	-	-	-	-	-
0.90	21.30 ⁽²⁾	-	4.31 ⁽²⁾	-	-	25.64 ⁽¹⁾	-	5.81 ⁽¹⁾
0.85	-	18.74 ⁽¹⁾	-	3.14 ⁽¹⁾	-	32.78 ⁽¹⁾	-	5.64 ⁽¹⁾
0.80	23.49 ⁽¹⁾	-	-	-	31.43 ⁽¹⁾	-	6.24 ⁽¹⁾	-
0.75	25.31 ⁽¹⁾	-	3.84 ⁽¹⁾	-	41.21 ⁽²⁾	-	6.93 ⁽²⁾	-

(1) - apenas um resultado

(2) - dois resultados

Nos gráficos das Figuras a seguir são apresentados os resultados do Quadro acima, inseridos, em cada caso pertinente, na evolução das resistências determinadas mais cedo. Para facilidade de análise são apresentadas conjuntamente as resistências em compressão simples e em tracção.

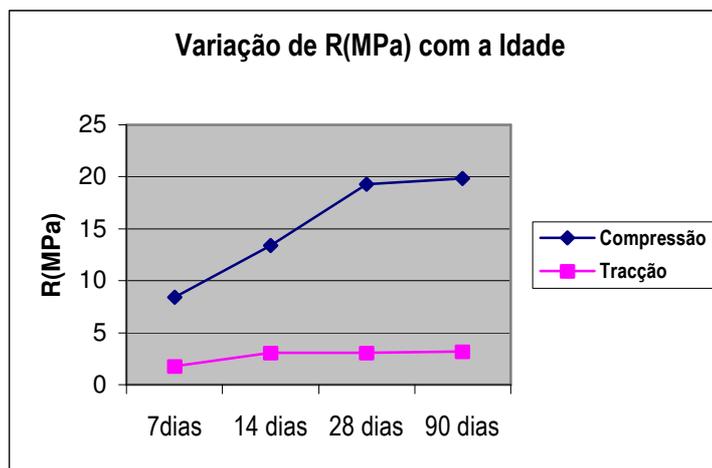


Fig. 6.31. - 12M-SC-Comp.0 (ACT/MC=1)

Pode verificar-se que a evolução com a idade é muito ligeira, quer em compressão quer em tracção. Em qualquer dos dois casos verifica-se um nítido abrandamento com a idade, sendo mais natural admitir que não se verifica

evolução, mas apenas que se tratam de valores dentro da dispersão admissível para estes materiais. Os valores aos 90 dias não seriam, assim, valores distintos dos que se verificaram aos 28 dias.

A Fig. 6.32. mostra agora a evolução das resistências para a Comp.1, ainda com a concentração 12M.

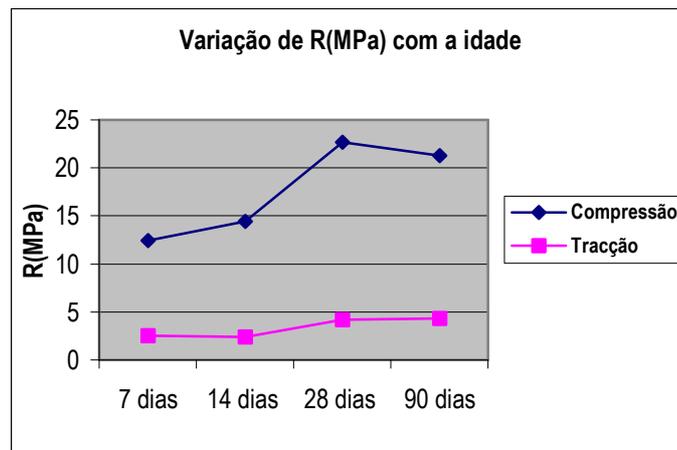


Fig. 6.32. - 12M-SC-Comp.1 (ACT/MC=0.90)

Neste caso o abrandamento é mais nítido, envolvendo mesmo a diminuição da resistência à compressão, enquanto na tracção o valor aos 90 dias sofre um pequeno aumento. Parece manter-se o tipo de comportamento já referido na composição anterior.

Em relação à Comp. 2 (ACT/MC=0.85) obtiveram-se resistências aos 120 dias e não aos 90 como nos casos precedentes. Poderia verificar-se com mais idade alguma tendência que pudesse ser de assinalar.

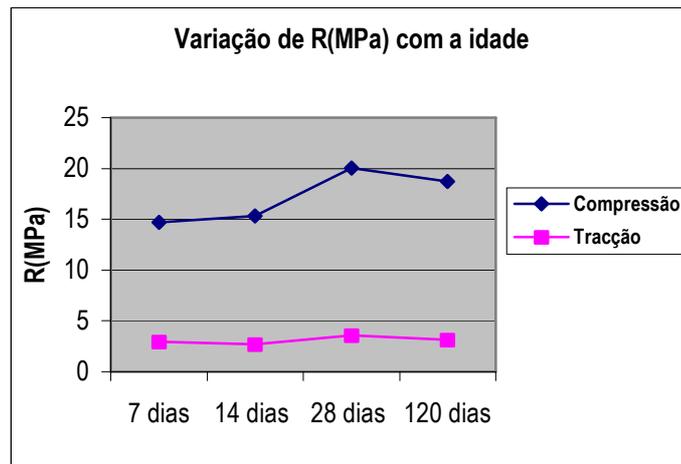


Fig. 6.33. - 12M-SC-Comp.2 (ACT/MC=0.85)

Os resultados parecem mostrar que mesmo num intervalo de tempo mais dilatado não se registam alterações do comportamento já referido nos casos antecedentes. De resto, os gráficos das Figs. 6.32. e 6.33. são muito semelhantes, deixando indicações de que os fenómenos que provocam o endurecimento das pastas evoluem com taxas muito próximas.

A Fig. 6.34. mostra o gráfico da evolução das resistências com a Comp.3 (ACT/MC=0.80), não se mostrando o resultado da resistência à tracção aos 90 dias por não se dispor de provete para ensaio a essa idade.

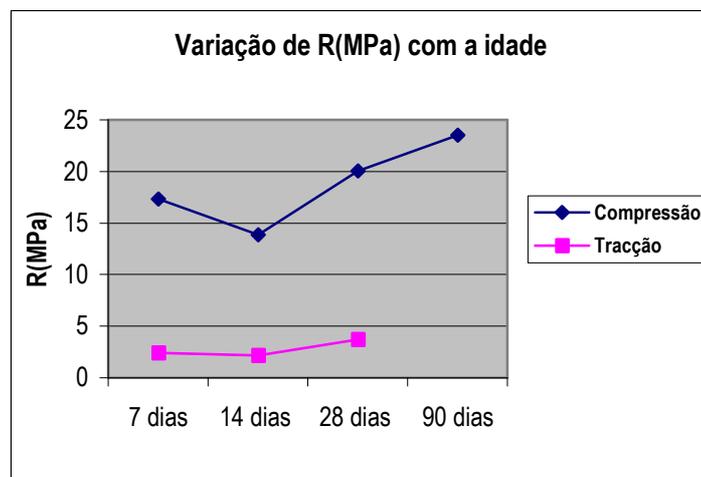


Fig. 6.34. - 12M-SC-Comp.3 (ACT/MC=0.80)

Ao contrário do que tem sido a evolução dos casos anteriormente estudados, regista-se uma franca evolução da resistência à compressão quando se passa dos 28 para os 90 dias, embora com diminuição ligeira da taxa de crescimento. É sabido que a razão ACT/MC tem efeito directo nas resistências mecânicas, que aumentam quando ela diminui, e portanto a evolução que se verifica aqui aos 90 dias poderia resultar desse efeito. Pode considerar-se, porém, que o valor dos 90 dias ainda está dentro do quadro de variação que é aceitável esperar.

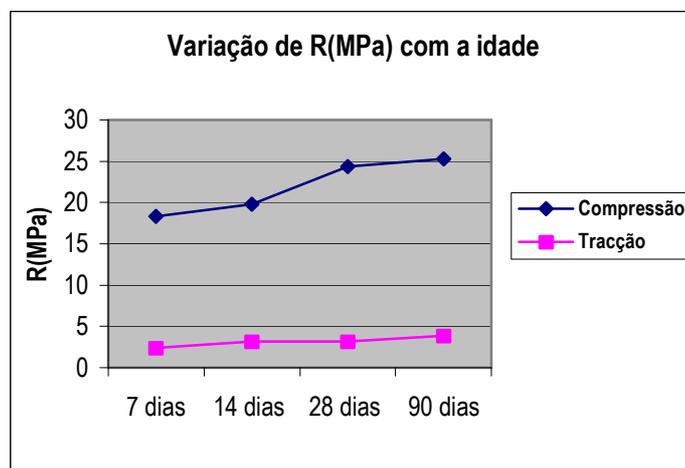


Fig. 6.35. - 12M-SC-Comp.4 (ACT/MC=0.75)

É interessante registar que também nesta composição (com mais baixo valor da razão ACT/MC) se verifica em ambas as resistências uma evolução positiva dos 28 para os 90 dias, com a diminuição da presença de fase líquida, embora com taxas de crescimento que permitem aceitar integrar esses valores dentro da dispersão natural dos resultados.

As Figuras seguintes referem-se à evolução gráfica das resistências obtidas com a concentração 15M no activador alcalino, começando com a razão ACT/MC=0.90 por não se dispor de resultados para a razão ACT/MC=1.

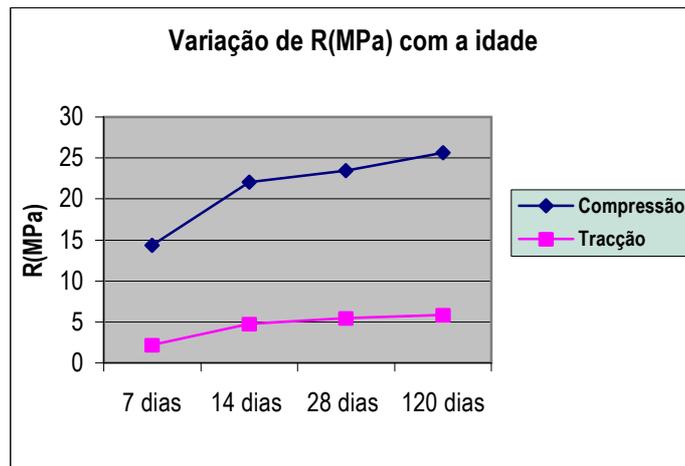


Fig. 6.36. - 15M-SC-Comp.1 (ACT/MC=0.90)

Apesar do aumento verificado aos 120 dias e do incremento da taxa de crescimento de resistências (tanto em compressão como em tracção), não parece, na linha do que se vem afirmando, que se esteja perante uma evolução significativa, fora do comportamento esperado.

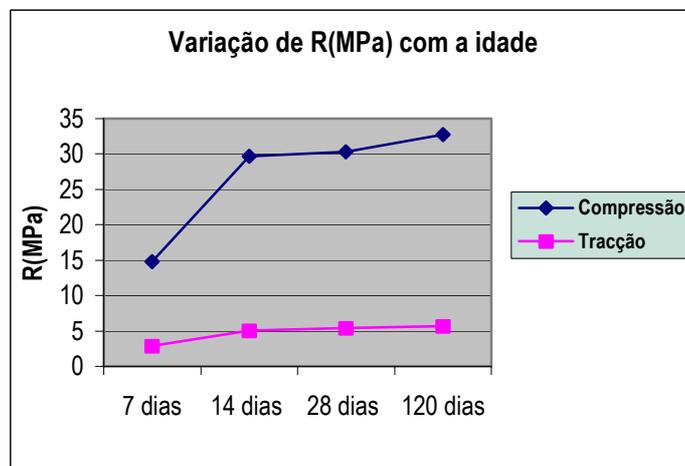


Fig. 6.37. - 15M-SC-Comp.2 (ACT/MC=0.85)

A evolução das resistências de compressão e tracção, tendo em atenção o que se verificou na composição anterior, parece confirmar na concentração 15M uma mais nítida tendência de crescimento com a idade, muito semelhante ao tipo de evolução que se conhece nas argamassas e betões de cimento Portland.

O ligeiro aumento da taxa de crescimento entre os 28 e os 120 dias não parece constituir alteração da tendência que parece desenhar-se para um valor assintótico a mais longa idade.

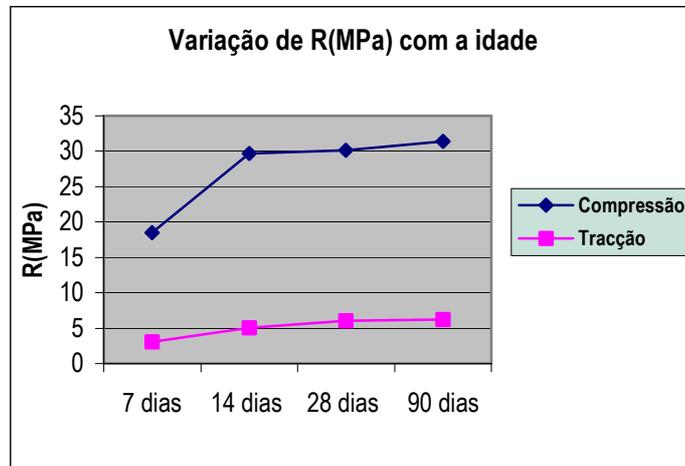


Fig. 6.38. - 15M-SC-Comp.3 (ACT/MC=0.80)

Os valores obtidos com a razão ACT/MC=0.80 estão de acordo com a tendência manifestada pelos resultados anteriores, tendência essa para ligeira subida das resistências tanto em compressão como em tracção.

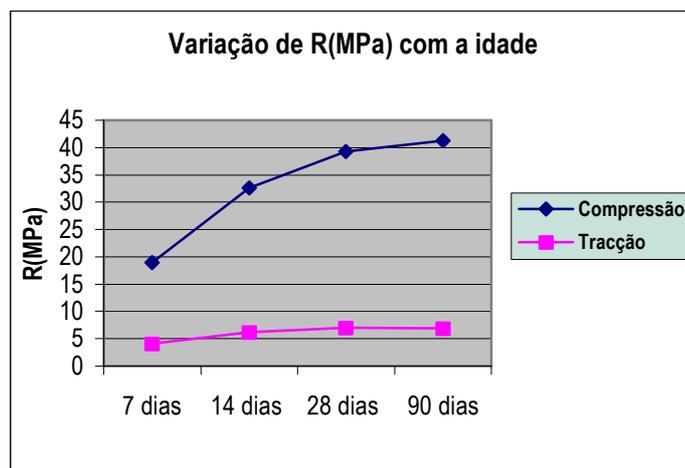


Fig. 6.39. - 15M-SC-Comp.4 (ACT/MC=0.75)

A evolução registada nesta composição com a razão ACT/MC mais baixa, parece confirmar da maneira mais clara o tipo de tendências que se vinham

percebendo dentro da evolução das resistências mecânicas com as idades mais avançadas. O tipo de curva obtido tanto em compressão como em tracção é do mesmo tipo das que se conhecem nos ganhos de resistência dos produtos de CPN: ganho progressivo de resistências com a idade, mostrando atenuação suave da taxa de crescimento. A evolução que se verificou na concentração 12M não é tão nítida como a que se registou na concentração 15M, o que também parece confirmar os reparos que oportunamente se fizeram quanto à eficácia distinta que as duas concentrações têm no processo de activação.

É de referir, entretanto, que o carácter amorfo dos materiais geopoliméricos não parece ser propício a desenvolver evoluções de longo prazo nas resistências mecânicas. Enquanto que num edifício de natureza cristalina se pode esperar uma densificação progressiva da rede de cristais (mais lenta a formar-se) com o natural reflexo no comportamento mecânico, nos corpos amorfos o ganho de resistência é mais rápido e mais dependente da disponibilidade de material reactivo. Quando um determinado componente se esgota, por exemplo o agente activador, poderá ficar algum metacaulino por activar que permanece no produto como material inerte, aprisionado na pasta endurecida mas sem experimentar evolução a partir daí. Se é o activador que fica em excesso, após todo o metacaulino se ter “consumido” na reacção, a libertação é mais fácil, formando micro-canais até à superfície que dão lugar a uma estrutura mais porosa e normalmente a uma menor resistência global.

6.4.2. Resistências Mecânicas em Composições com Cal

Apresentam-se agora os resultados obtidos em idades mais avançadas dos ensaios obtidos em provetes fabricados com substituição parcial de metacaulino por cal. O Quadro 6.12. mostra os valores registados.

Quadro 6.12. - Resistências em Idades Avançadas

	12M						15M					
	Compr. Simples			Tração			Compr. Simples			Tração		
	60d	90d	120d	60d	90d	120d	60d	90d	120d	60d	90d	120d
Comp.0	15.03	-	-	3.13	-	-	20.51	-	-	3.46	-	-
Comp.1	22.07	-	-	4.11	-	-	21.09	-	-	3.42	-	-
Comp.2	-	27.33	-	-	5.02	-	24.11	-	-	3.71	-	-
Comp.3	29.67	-	-	5.31	-	-	-	35.20	-	-	5.33	-
Comp.4	-	-	46.18	-	-	5.27	-	43.39	-	-	6.85	-

Da mesma forma que anteriormente apresentam-se agora os gráficos de evolução das resistências em cada composição.

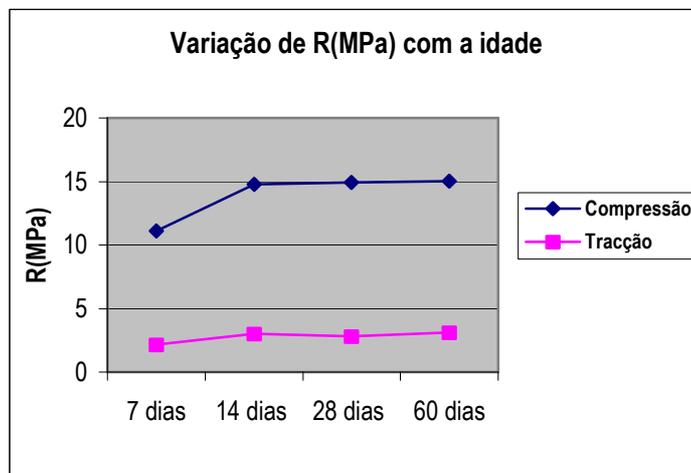


Fig. 6.40. - 12M-CC-Comp.0 (ACT/MC=1)

O comportamento desta primeira composição parece mais regular do que a correspondente sem incorporação de cal. A resistência aos 60 dias praticamente mantém a resistência obtida aos 28, com ligeiro aumento, mas ajudando a configurar uma evolução suave tendente para a estabilização. Menos definida a mesma tendência parece verificar-se na resistência à tração.

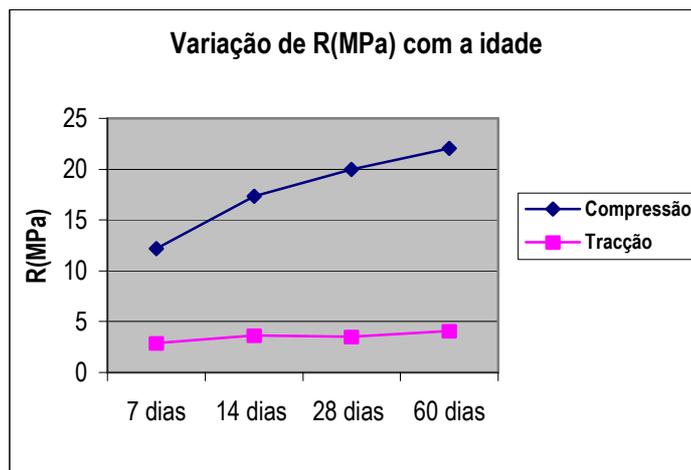


Fig. 6.41. - 12M-CC-Comp.1 (ACT/MC=0.90)

Também nesta composição se verifica uma evolução mais nítida, com tendência para aumento da resistência à compressão com o avanço da idade, menos marcada no que diz respeito à tracção. A taxa de crescimento diminui, embora ainda pareça haver margem para algum aumento digno de registo. Refere-se, todavia, a tendência para a diminuição da taxa de ganho de resistência.

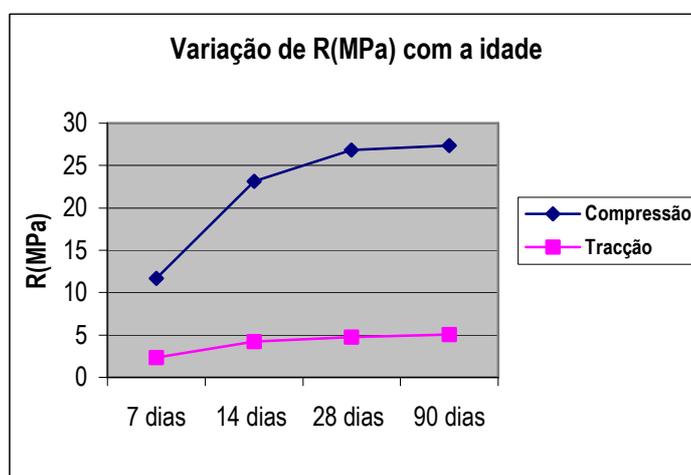


Fig. 6.42. - 12M-CC-Comp.2 (ACT/MC=0.85)

Este gráfico confirma uma vez mais a tendência nítida para uma evolução similar à que é conhecida nos produtos de CPN - taxas de crescimento altas na primeira fase, tendendo para uma diminuição gradual com o andamento da idade. Este processo verifica-se tanto na compressão como na tracção.

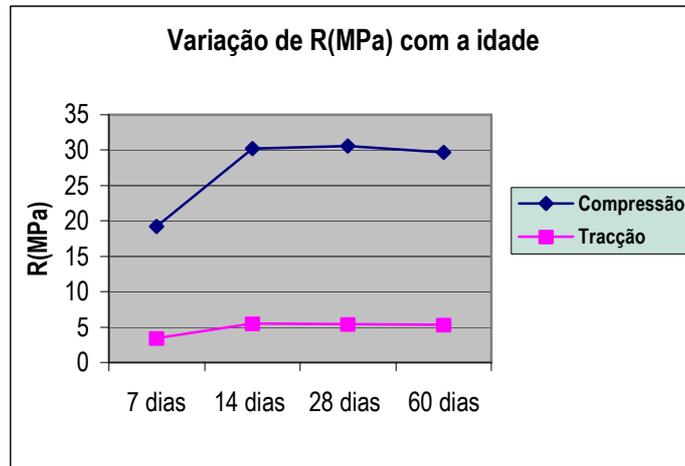


Fig. 6.43. - 12M-CC-Comp.3 (ACT/MC=0.80)

A tendência para a estabilização é evidente tanto em compressão como em tracção, sendo aqui mais marcada a partir dos 14 dias de idade, data em que, como na composição 0, se não regista mais aumento das resistências mecânicas.

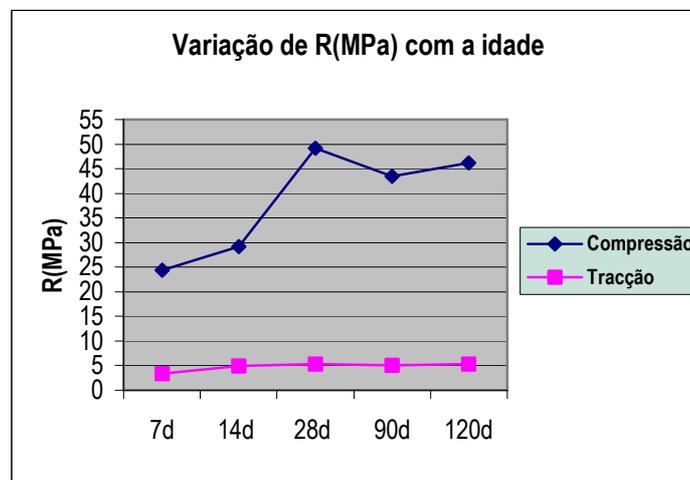


Fig. 6.44. - 12M-CC-Comp.4 (ACT/MC = 0.75)

Dispôs-se aqui de mais informação sobre o comportamento mecânico do material e que de um modo geral confirma tudo o que fica dito para trás. A partir de um certo tempo, que pode variar entre os 14 os 28 e por vezes até mais dias, as resistências em compressão e em tracção estabilizam, não apresentando grandes

flutuações à volta do valor obtido aos 28 dias. No caso em análise regista-se uma diminuição das resistências em relação ao valor obtido aos 28 dias, mas a resistência aos 120 é superior à que se obteve aos 90 dias. Pode considerar-se que se trata, como nos casos anteriores, de simples dispersão de valores de ensaio.

Pode afirmar-se que mesmo nos ensaios feitos em provetes com mais idade de cura, a presença da cal na composição do precursor geopolimérico introduz nesta concentração de 12M um efeito estabilizador que conduz a comportamentos mais regulares no sentido em que não há tanta flutuação nos valores intermédios como acontece nos resultados obtidos sobre provetes sem cal. É de registar que o comportamento global das resistências, comparado com o que se obteve na concentração 15M sem substituição de cal, é muito semelhante, parecendo dar indicações que o nível de alcalinidade óptimo, em termos de $[\text{OH}^-]$, andarà perto desta última concentração, sendo por isso vantajosa a presença da cal (hidróxido de cálcio) na concentração inferior.

Nas Figuras que se seguem é apreciado o efeito que a presença de cal confere ao comportamento dos provetes em que a concentração é de 15M.

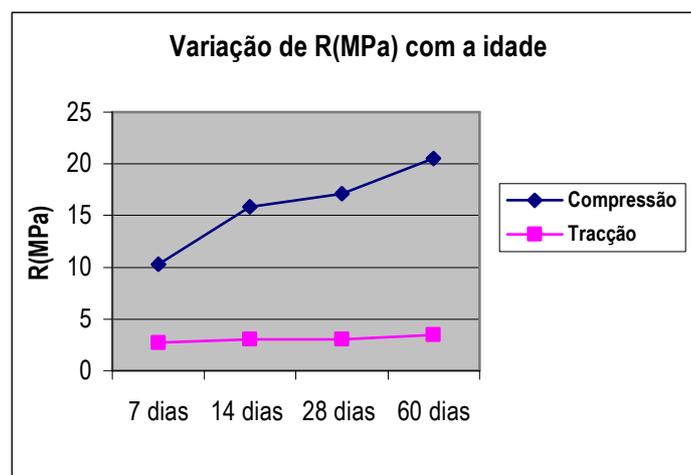


Fig. 6.45. - 15M-CC-Comp.0 (ACT/MC=1)

Verifica-se uma tendência para o crescimento das resistências em compressão e em tracção para lá dos 28 dias, com aumento da taxa de ganho de resistência, circunstância que de certo modo escapa à evolução que até foi registada. Será aconselhável apurar o que se verifica com as restantes composições antes de tentar explicar o sucedido.

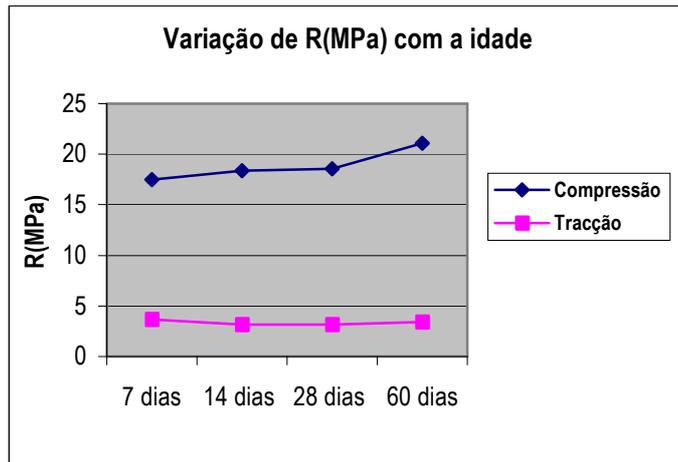


Fig. 6.46. - 15M-CC-Comp.1 (ACT/MC=0.90)

Menos acentuadamente, mas ainda assim com alteração da taxa de crescimento, continua a verificar-se um acréscimo da resistência à compressão com a idade, embora na tracção se verifique de certo modo o contrário. Mas é sabido que as resistências à tracção nem sempre mostram um padrão bem definido de evolução.

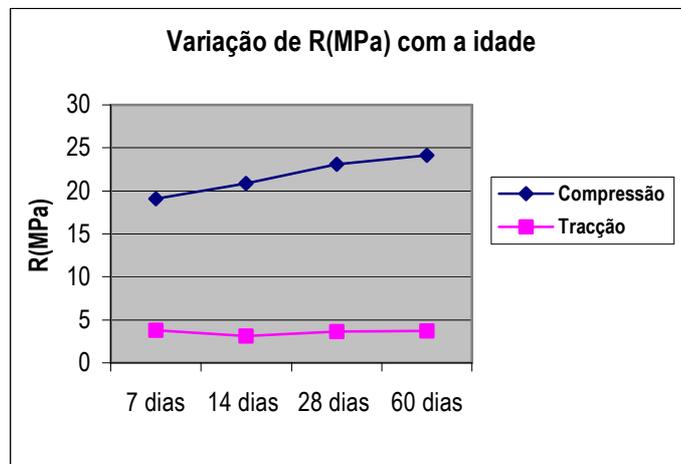


Fig. 6.47. - 15M-CC-Comp.2 (ACT/MC=0.85)

De novo se registam indicações que a resistência à compressão continua a evoluir com a idade, com taxa de crescimento quase constante desde os 7 dias. Na tracção regista-se alguma flutuação, podendo afirmar-se que os números indicam alguma estabilização de comportamento.

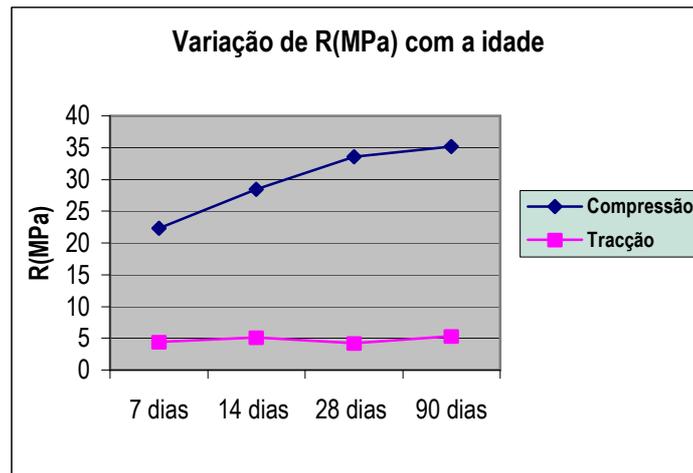


Fig. 6.48. - 15M-CC-Comp.3 (ACT/MC=0.80)

O padrão continua claramente definido nas resistências à compressão, que continuam a manifestar tendência para evoluírem com a idade, embora com alguma sentido de atenuação, enquanto é patente a estabilização à volta dos 5 MPa desde idade muito precoce nas resistências à tracção.

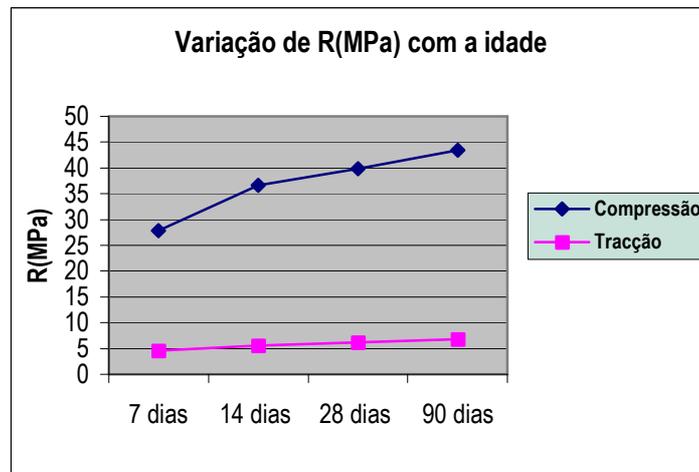


Fig. 6.49. - 15M-CC-Comp.4 (ACT/MC = 0.75)

A Fig. 6.49. evidencia finalmente, para a composição com menos presença de activador (ACT/MC=0.75), um andamento em ambas as resistências evolutivo com a idade, embora se possa referir que na compressão parece desenhar-se alguma tendência para o abrandamento, até porque as resistências se situam já num patamar elevado para argamassas.

Pode em termos de análise geral referir-se que a característica mais nítida do padrão de comportamento dos provetes activados com a presença de cal consiste, em comparação com os provetes em que a cal não foi incluída, na tendência para se manter o aumento da resistência à compressão com o passar do tempo, parecendo que a maior concentração de hidroxilos [OH⁻] produz efeitos secundários diferidos no tempo, já que nas composições sem cal parece mais marcada a tendência para a estabilização. Nas resistências à tracção essa tendência parece desenhada, embora de modo menos claro.

Quando comparados os níveis de resistências alcançados nas misturas sem e com cal, verifica-se que nas últimas as resistências à compressão simples são sempre mais elevadas, pois muito possivelmente da acção continuada do agente activador se obtém reforço da formação de tecido cimentício. Nas tracções os aumentos não são tão evidentes entre os dois tipos de composição.

6.5. Activação com Activador Composto (Silicato e Hidróxido de Sódio)

6.5.1. Argamassas

Os resultados obtidos com o activador simples (NaOH) permitiram estabelecer uma melhor compreensão da forma de actuação dos reagentes

alcalinos e obter um ponto de partida para a formulação de um activador composto mais estruturado.

A concentração de 15M, de todas as que foram atrás estudadas, parece ser aquela que conduz à gama de resultados mais elevados e mais consistentes em termos do comportamento mecânico. Os resultados apresentados no ponto 5.2. do Cap. 5 e em particular nos Quadros 5.2. e 5.6. já apontaram para a concentração 15M de NaOH e uma taxa de combinação silicato/hidróxido de 2 para 1, como os vectores de composição do activador alcalino mais indicados.

São agora apresentados os resultados dos ensaios que foram alcançados com as argamassas de composição CB_i (onde $i=A,B,C,D$) indicadas no Quadro 5.3. No fabrico e cura dos provetes seguiram-se as regras apontadas no Cap. 5. Os resultados sobre argamassas são mostrados no Quadro 6.13. e representam a média de três provetes, ensaiados nas idades indicadas.

Quadro 6.13. - Resistências à Compressão Simples (MPa)

<i>Idade</i>	<i>CB</i>	<i>CBA</i>	<i>CBB</i>	<i>CBC</i>	<i>CBD</i>
7 dias	35.56	27.62	52.80	42.16	45.32
14 dias	36.76	29.15	60.04	44.43	46.34
28 dias	36.95	31.29	60.35	43.87	47.09

Estes valores patenteiam, além de um comportamento mecânico superior ao da média dos resultados com activador simples, também uma maior regularidade de resultados. De facto, a dispersão é muito menor, como se poderá ver à frente, quando se proceder à análise estatística dos resultados. A composição CBB é de todas as composições de argamassas estudadas aquela que conduz aos melhores resultados em compressão simples.

Recorda-se aqui que na combinação CBB foi feita a correcção do teor de óxido de sódio directamente no activador, através de uma maior concentração do hidróxido de sódio.

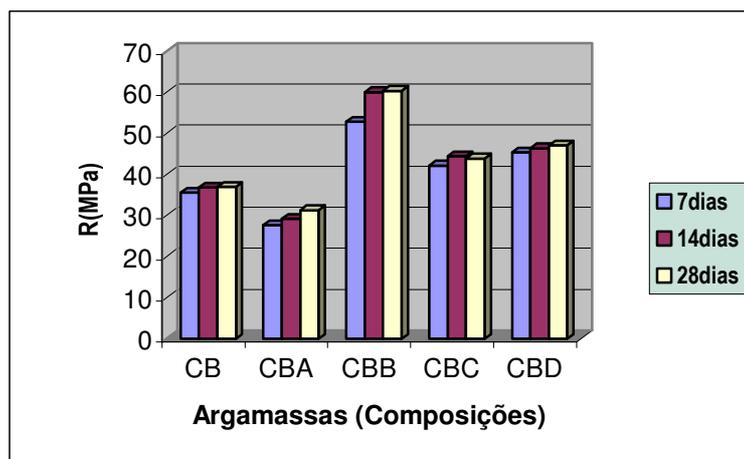


Fig. 6.50. – Resistências à Compressão em Argamassas

Constatou-se também, ao longo destes ensaios com argamassas activadas com activador composto, que as resistências experimentaram em geral uma evolução pequena para além dos 7 dias de idade. De facto, verifica-se no Quadro 6.13. e para a generalidade das composições na Fig. 6.50., que a evolução das resistências entre os 7 e os 28 dias de idade só nas composições CBA e CBB tem algum significado (à volta de 14% contra a média de 4% nas outras composições).

Por outro lado, a utilização de silicato de sódio no activador (ainda que ele próprio dotado de alguma viscosidade) permitiu reduzir o carácter viscoso do hidróxido de sódio, fazendo com que as pastas fossem mais fáceis de trabalhar.

A representação gráfica não tem, neste caso, grande sentido na medida em que as diferenças de constituição entre as diversas composições não reflectem nenhuma variação específica de um mesmo parâmetro, antes sim, de acordo com os critérios de formulação, traduzem certos e determinados aspectos que mereceram particular atenção neste trabalho (a correcção do teor em Na_2O , a presença de cal, a razão silicato/hidróxido, e outros).

6.5.2. Geobetões

Para o estudo dos geobetões e das condições de activação das misturas sólidas foram seguidas algumas orientações de partida que, porém, não constituem qualquer limitação ou condicionamento à forma de estudar estes materiais. A activação foi feita com o activador S (S de sódio), composto de hidróxido de sódio e silicato de sódio na proporção de 1 para 2. O estudo da constituição dos agregados foi feito pelo Método de Faury, um método clássico para o estudo dos betões de CPN e que tem como principal objectivo a obtenção de elevada compacidade aliada a condições de trabalhabilidade das pastas.

Os resultados dos ensaios de compressão simples em provetes de geobetão com 4x4x16 cm³, estão seriados no Quadro 6.14., tendo os provetes sido fabricados de acordo com as composições indicadas no Quadro 2.14. A cura foi feita à temperatura ambiente com os provetes envolvidos em filme de polietileno.

Quadro 6.14. – Compressão Simples do Geobetão (MPa)

<i>Idade</i>	<i>GA</i>	<i>GB</i>	<i>GC</i>	<i>GD</i>	<i>GE</i>
7 dias	49.56	54.13	62.03	65.14	70.99
14 dias	58.54	63.18	65.68	66.82	77.55
28 dias	57.17	61.44	65.89	68.25	77.31

média de 6 ensaios

A composição E, que recorre não só a uma maior dosagem de metacaulino, como ainda à incorporação de areia de Jales, é a que conduz aos valores mais altos das resistências mecânicas. Estas areias, muito finas, são parcialmente reactivas em meio alcalino, sendo essa, muito possivelmente, a razão das melhores resistências obtidas. É de assinalar também que a generalidade das composições apresenta um nível de resistências que, na tecnologia dos betões correntes de CPN, já se podem considerar de elevado desempenho (BED). A Fig. 6.51. apresenta os resultados sob forma gráfica.

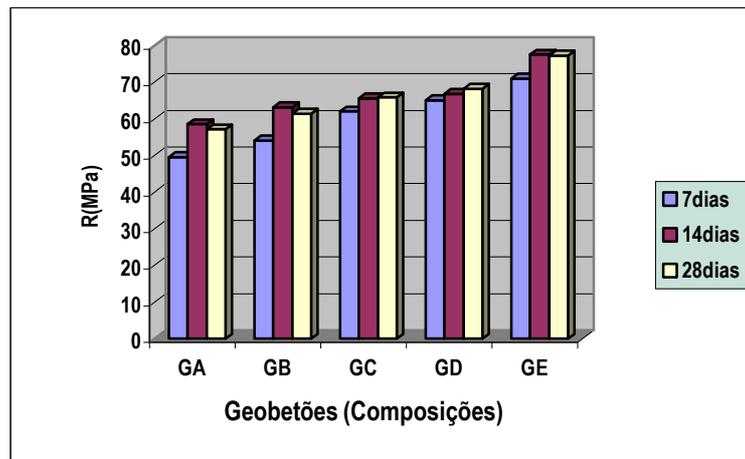


Fig. 6.51. - Resistências à Compressão em Geobetões

Regista-se uma evolução entre os 7 e os 28 dias da ordem dos 10% em média, com cerca de 15% na composição GA e à volta de 5% na composição GD. Todavia, em relação às resistências aos 14 dias de idade, a razão R_{28}/R_{14} é igual a 0.994, o que significa que as resistências aos 28 dias são inferiores às dos 14, mas também prenuncia que muito possivelmente a reacção de geopolimerização termina algures por volta dessa data, aos 14 dias. Vários autores, entre os quais Palomo *et al* [49] referem que a presença de silicatos alcalinos no activador tem como consequência um aumento da velocidade da reacção e também o aumento das resistências mecânicas.

Na medida em que as diferentes composições de geobetão se distinguem pelo aumento da dosagem de metacaulino, é conveniente traçar o gráfico da evolução das resistências à compressão simples, o que é feito na Fig. 6.52.

Como se refere no Quadro 2.14., na composição GA a dosagem de metacaulino é $300\text{kg}/\text{m}^3$, crescendo para $350\text{kg}/\text{m}^3$ na comp. GB, para $400\text{kg}/\text{m}^3$ na comp. GC, $450\text{kg}/\text{m}^3$ na comp. GD e finalmente $545\text{kg}/\text{m}^3$ na composição GE. Esta última foi elaborada com inclusão de uma porção de areia de Jales que dispõe de uma fracção bastante fina e apresenta por isso maior susceptibilidade ao ambiente alcalino.

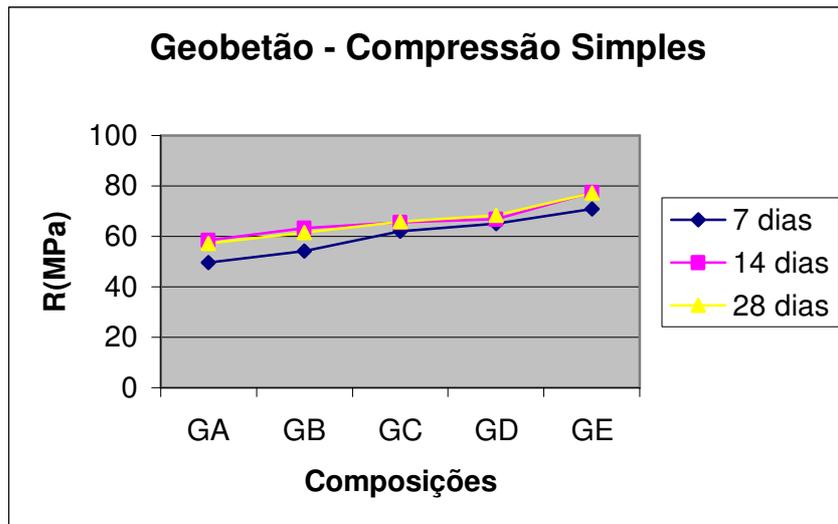


Fig. 6.52. - Variação da Resistência com a Composição

A análise das resistências mostra uma ligeira evolução à medida que aumenta a dosagem de metacaulino, atingindo o valor máximo para a composição dos 545kg/m³ (GE) que incorpora material de Jales. Enquanto esta última composição fornece valores acima dos 70 MPa, as restantes permitem obter valores médios no patamar dos 60-65 MPa.

É curioso referir que as curvas representativas das resistências aos 14 e 28 são praticamente coincidentes, verificando-se que a curva das resistências aos 7 dias lhes está muito próxima.

Os resultados obtidos com uma dosagem crescente de metacaulino levaram a que fosse ensaiada uma composição de 545 kg/m³ de metacaulino, mas sem material de Jales no sentido de averiguar se a hipótese formulada quanto à reactividade das areias finas dessas escombrelas tinha algum sentido. Os resultados máximos foram obtidos aos 14 dias e mostraram uma quebra razoável, pois a média de 3 provetes situou-se nos 62 MPa. Este resultado parece indiciar que as areias finas das Escombrelas de Jales constituem um vector de reacção, isto é, são com muita probabilidade elas próprias intervenientes no processo de geopolimerização. Fica em aberto a possibilidade de os materiais alumino-

silicatados que constituem os agregados poderem intervir na reacção de geopolimerização desde que a sua reactividade seja aumentada previamente, ou por tratamento térmico (como é o caso do caulino) ou por moagem aumentando a superfície específica, ou de uma forma mais completa, por ambos os métodos.

Em tracção o comportamento dos provetes forneceu os resultados indicados no Quadro 6.15., sendo o Gráfico 6.53. representativo da evolução dessas resistências.

Quadro 6.15. – Tracção do Geobetão (MPa)

<i>Idade</i>	<i>GA</i>	<i>GB</i>	<i>GC</i>	<i>GD</i>	<i>GE</i>
7 dias	6.12	6.37	6.54	8.45	6.95
14 dias	6.08	7.01	6.33	10.31	7.45
28 dias	6.15	6.56	6.18	9.65	7.12

Os valores situam-se em todas as composições em níveis que se podem considerar elevados face ao que é corrente nos betões de CPN. Só mesmo nos BED se conseguem valores semelhantes. Na composição GD chegam a atingir-se aos 14 dias valores médios superiores a 10 MPa, com um dos provetes da série a rebentar muito perto dos 12 MPa.

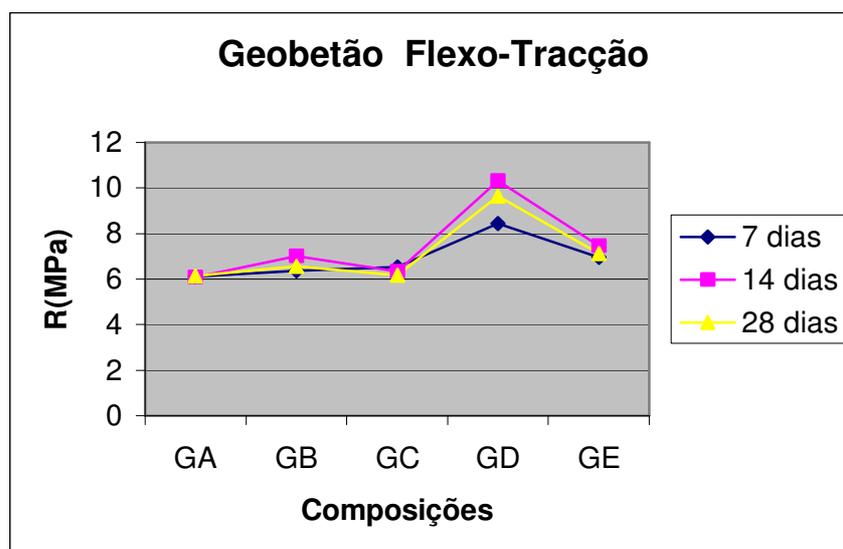


Fig. 6.53. – Variação da Resistência com a Composição

Pode ver-se também que os valores tendem a estabilizar por volta dos 7 dias de idade. Daí a recente proposta do investigador espanhol Angel Palomo na Conferência Geopolymer 2002 em Melbourne de se passar a definir a resistência característica dos materiais geopoliméricos não aos 28 como no betão de CPN, mas aos 7 dias.

Não se regista, salvo na composição GD, uma evolução muito significativa dos valores médios da resistência à tracção com a idade. Mesmo para a composição GE, aquela que melhores resultados tinha alcançado em compressão simples, os valores em tracção são agora comparáveis aos das outras idades, sendo até por vezes ultrapassados.

Pelo interesse que tem em termos da determinação de valores com significância estatística, o Quadro seguinte apresenta, para as diferentes composições, os valores das resistências R_i ($i=1,\dots,6$) obtidas nos 6 provetes ao fim de 7 dias e os respectivos valores característicos determinados de acordo com os procedimentos indicados na ENV 206. Para $n \geq 6$, há que satisfazer simultaneamente as duas condições seguintes:

$$f_{ck} \leq X_n - 1.87 S \quad \text{e} \quad f_{ck} \leq X_{\min} + 3$$

onde, f_{ck} - é o valor da resistência característica

X_n - é a média dos 6 resultados, com $n=6$

S - é o desvio padrão da amostra

1.87 e 3 - são os valores dos parâmetros λ e k para $n=6$

O Quadro 6.16. resume os valores dos ensaios individuais e das resistências características finais.

Quadro 6.16. - Resistências Características em Compressão Simples

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	Méd.	Dpad.	f_{ck}
GA	48.24	47.63	54.92	49.00	51.14	46.43	49.56	3.06	43.84
GB	57.36	51.64	54.11	55.54	53.40	52.71	54.13	1.88	50.63
GC	63.41	60.18	64.05	59.31	59.17	66.08	62.03	2.88	56.64
GD	63.82	62.79	66.53	63.99	67.12	66.59	65.14	1.82	61.74
GE	72.15	71.69	69.45	68.78	71.84	72.03	70.99	1.48	68.22

Regista-se o facto de os desvios-padrão serem bastante baixos. Apesar de se tratar de provetes feitos em laboratório, portanto com maior controlo dos factores que normalmente provocam a dispersão, nota-se que a dispersão é menor, principalmente na gama de valores mais altos. É visível pela análise do Quadro que os resultados espelham grande homogeneidade, com coeficientes de variação muito pequenos (da ordem dos 2 a 3%, não apresentados no Quadro).

Finalmente, foram apuradas para as composições de geobetão utilizadas neste trabalho as razões entre os principais óxidos presentes na mistura sólidos+líquidos, de acordo com os princípios enunciados no Cap. 5. O Quadro 6.17. apresenta os valores dessas razões, tendo em conta a composição química dos diversos componentes (metacaulino, areias, activador composto)

Quadro 6.17. - Razões entre Óxidos no Geobetão

Razões	GA	GB	GC	GD	GE
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3.66	3.63	3.61	3.59	4.07
$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	0.83	0.83	0.83	0.83	0.76

Como se esperava, uma vez que as composições foram estudadas por um critério de compacidade (Método de Faury), as razões são bastante distintas das que se obtiveram de acordo com as indicações de Davidovits. Regista-se o facto de

as razões apresentarem valores praticamente constantes em todas as composições, embora na última (GE) se verifiquem ligeiros desvios pelo facto de se terem introduzido algumas alterações na composição (nomeadamente a inclusão de areia de Jales). As alterações agora registadas são também o resultado de ser ter adoptado um activador que apresenta uma razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ diferente do valor preconizado pelo investigador francês.

Não se excluindo a possibilidade de, com recurso a essas razões, ditas ideais, se obterem valores globais de comportamento mecânico superiores aos encontrados neste trabalho, ainda que não cumprindo da melhor forma os critérios de compacidade que estão implícitos no Método de Faury, deve referir-se que tal situação impõe, em termos práticos, correcções e manipulações de ordem química que não parecem consistentes com a utilização de um caulino (o Mibal-A) ainda com um nível razoável de impurezas e que assumidamente não se corrigiram.

6.5.3. Análise Microscópica de Provetes Fracturados de Geobetão

Com o objectivo de avaliar de que modo se comporta o geobetão na ruptura, em comparação com o betão de CPN, fabricaram-se cubos de 15 cm de aresta dos dois materiais, de acordo com as composições já indicadas, que após cura adequada foram ensaiados em compressão simples aos 7 e 28 dias de idade, respectivamente.

A observação visual dos dois provetes, após serragem na mesa de corte para se obter uma boa superfície de estudo, mostra que enquanto no betão de CPN há um princípio de individualização e separação dos agregados, uma vez que as linhas de fractura tendem a contornar a superfície destes, verifica-se no geobetão uma maior coesão entre a pasta geopolimérica e os agregados de tal forma que as

linhas de fractura atravessam indiferenciadamente a matriz cimentícia e os agregados.

A Figura 6.54., que documenta as amostras dos dois provetes serrados, evidencia os aspectos que se acabaram de referir, sendo perceptível nos agregados mais à esquerda do provete de geobetão que algumas superfícies de fractura atravessam os próprios agregados, indicando que a resistência da interface argamassa/agregado é superior à resistência mecânica da própria pedra que constitui esses agregados. A dimensão máxima destes agregados foi de 9.5 mm.

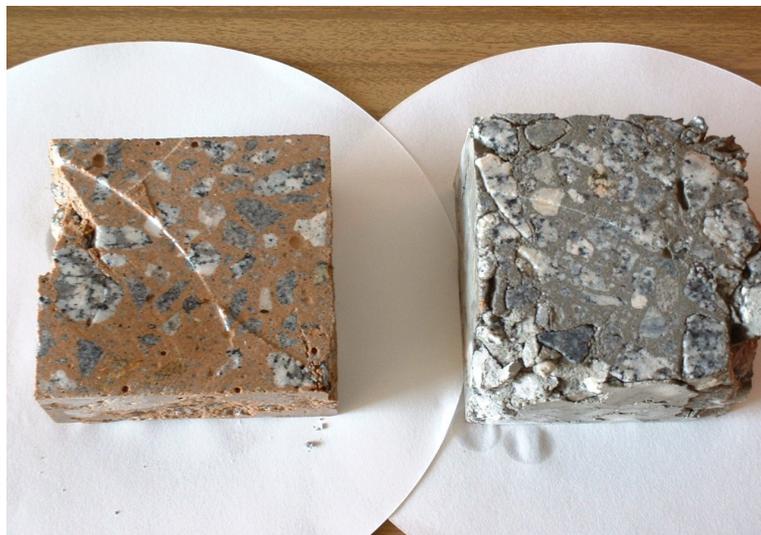


Fig. 6.54. - Provetes Fracturados de Geobetão (esq.) e Betão de CPN (dir.)

No caso do betão de CPN, fabricado exactamente com os mesmos materiais, são evidentes os destacamentos dos agregados, sendo por esse motivo mais difícil proceder à serragem mecânica. No provete de geobetão a serragem não levantou qualquer dificuldade, por não se verificar destacamento dos elementos de brita.

A análise macroscópica, necessariamente limitada, foi completada com a observação em SEM (microscopia electrónica de varrimento) de amostras retiradas dos dois provetes e que ajudam a comprovar a importância da ligação argamassa/agregado no comportamento mecânico do geobetão.

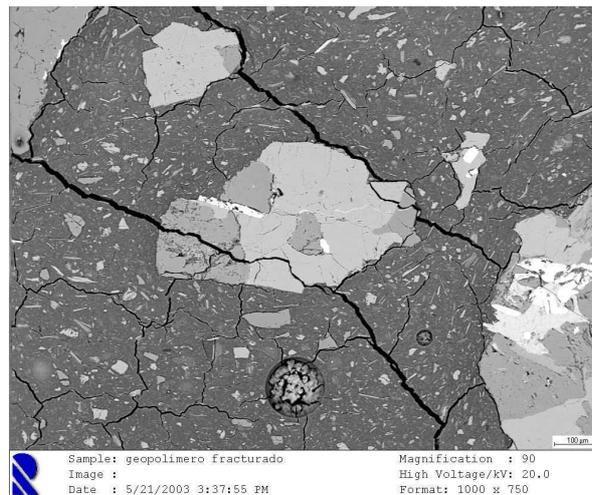


Fig. 6.55. - SEM - Geobetão (partícula de areia)

A Fig. 6.55. mostra a ampliação de uma partícula com a dimensão aproximada de 0.6 mm (uma pequena partícula de areia), sendo visível no bordo inferior que a linha de fractura se prolonga para o interior da partícula, enquanto a zona de contacto nos bordos laterais da partícula na zona de contacto se mantém intacta, apesar da sua pequena dimensão.

Deste modo se pode perceber que a resistência da ligação da partícula à matriz cimentícia é maior que a resistência da partícula em si, que também apresenta outros sinais de fractura na sequência do ensaio de compressão.

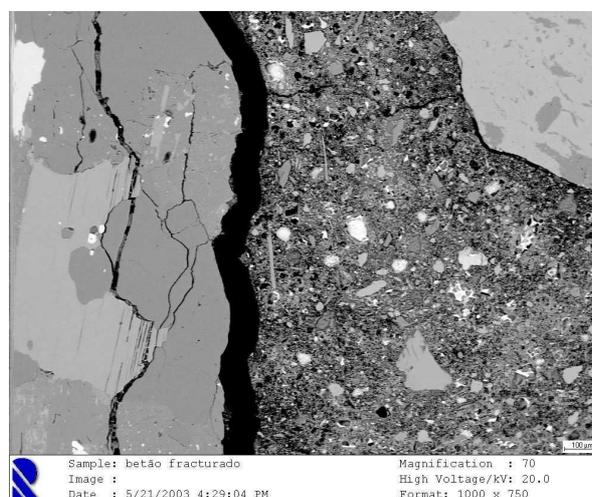


Fig. 6.56. - SEM - Betão CPN (Interface pasta-agregado)

Em comparação, a lâmina retirada da amostra de betão de CPN fracturado na sequência do ensaio de compressão simples, que se apresenta na Fig. 6.56., mostra claramente a passagem das linhas de fractura contornando o agregado.

6.6. Análise Estatística

Decorre do limitado número de provetes ensaiados em cada fase do processo (3 em geral, excepcionalmente 6 no geobetão) a dificuldade de trabalhar os dados por forma a obter resultados com significado estatístico.

Apesar de tudo, é possível, e com alguma aproximação, fazer uma abordagem estatística dos resultados obtidos em que são avaliadas algumas tendências de evolução das resistências e apontados alguns valores que poderão ser tomados como uma primeira referência para a quantificação do comportamento dos geopolímeros. As medidas de estatística descritiva, medidas de tendência central e de dispersão e a Distribuição “*t de Student*” têm a particularidade de permitir situar os resultados, avaliar a sua dispersão e prever os intervalos de ocorrência das variáveis com um certo valor da probabilidade. Serão utilizadas nesta análise sempre que tal for aceitável.

6.6.1. Parâmetros Estatísticos

Em primeiro lugar são calculados para todos os casos em estudo, os valores da média, desvio padrão e coeficiente de variação. Estas medidas de tendência central e de dispersão dão sempre a ideia do comportamento da variável, permitindo aperceber uma tendência da possível evolução dos resultados.

A comparação do coeficiente de variação entre os casos estudados permitirá avaliar a variabilidade dos resultados de provetes fabricados na mesma

amassadura, e aleatoriamente seleccionados depois para ensaio aos 7, 14 e 28 dias. Os provetes são, por isso, formalmente idênticos.

Foram obtidos os intervalos de variação das resistências, de acordo com a Lei de Student, com o nível de significância $\alpha = 0.10$. Deste modo, delimita-se o campo que incluirá 90% dos valores possíveis, admitindo-se que 5% possam estar abaixo do valor mínimo e 5% acima do valor máximo dos limites respectivos do intervalo. No caso específico das resistências de argamassas e geobetões, o valor das resistências máximas não deve ser excluído, pois em termos práticos o que importa é definir estatisticamente o valor mínimo que determinada composição poderá alcançar. Poderá por isso dizer-se, ao considerar um nível de significância $\alpha = 0.10$, que esse valor mínimo é igualado ou excedido em 95% das vezes. Esta é, de resto, a definição de resistência característica.

Pese embora o diminuto tamanho da amostra, será possível ter uma indicação do tipo de evolução estatística das resistências, sendo de esperar uma melhoria significativa com o aumento do número de provetes em análise. De resto, a distribuição "*t de Student*" é particularmente indicada para análise estatística de séries curtas. Os valores do intervalo de variação da variável são definidos pela expressão

$$x \pm t.s \quad (A)$$

onde, x - é o valor da amostra

t - é o coeficiente de "Student" para $n = 3$ e $\alpha = 0.10$. Tem o valor 2.92 [81]

s - o desvio-padrão da amostra

Correntemente é usual exprimir o intervalo de confiança para a média, que dá em cada caso a margem de erro para a verdadeira média, mas pareceu aqui mais interessante determinar o intervalo em que caem 90% dos valores da variável, sendo que apenas 5% são inferiores ao valor mínimo do intervalo.

6.6.2. Quadros de Resultados (Activador Simples)

I – Compressão Simples

São seguidamente apresentados os valores individuais obtidos com os ensaios à compressão simples, em diferentes idades, de argamassas com 3 concentrações de NaOH e diferentes razões ACT/MC. As composições 0,...4, estão indicadas no Capítulo 2.

12 M – NaOH – SC (sem cal)

Quadro 6.18. – Resultados Individuais dos Ensaios à Compr. Simples

<i>Idade</i>	<i>Comp. 0</i>	<i>Comp. 1</i>	<i>Comp. 2</i>	<i>Comp. 3</i>	<i>Comp. 4</i>
7dias	8.53	11.51	15.18	15.69	18.42
	8.87	12.10	14.85	18.49	17.87
	7.91	13.78	14.12	17.76	18.72
14dias	13.47	15.01	16.36	13.53	20.23
	13.53	13.98	14.17	13.41	19.92
	13.25	14.31	15.38	14.70	19.14
28dias	19.53	20.29	19.53	20.04	25.70
	19.64	21.47	19.92	21.24	25.11
	18.66	26.32	20.74	18.88	22.19

12 M – NaOH – CC (com cal)

Quadro 6.19. – Resultados Individuais dos Ensaios à Compr. Simples

<i>Idade</i>	<i>Comp. 0</i>	<i>Comp. 1</i>	<i>Comp. 2</i>	<i>Comp. 3</i>	<i>Comp. 4</i>
7dias	12.49	12.29	11.87	20.26	22.88
	10.30	11.98	11.56	17.46	25.13
	10.55	12.35	11.65	19.93	22.61
14dias	16.45	19.78	23.35	29.80	28.01
	14.40	16.44	21.33	32.94	30.47
	13.52	15.86	24.69	27.97	29.21
28dias	15.41	20.09	27.25	32.32	51.69
	14.82	20.54	27.67	31.09	49.44
	14.54	19.33	25.65	28.29	46.24

15 M - NaOH - SC

Quadro 6.20. – Resultados Individuais dos Ensaios à Compr. Simples

<i>Idade</i>	<i>Comp. 0</i>	<i>Comp. 1</i>	<i>Comp. 2</i>	<i>Comp. 3</i>	<i>Comp. 4</i>
7dias	9.68	14.98	14.48	17.01	18.91
	10.66	14.66	15.10	19.62	19.14
	10.52	13.39	14.74	18.89	18.74
14dias	18.63	21.78	31.57	30.95	33.28
	20.04	22.90	26.35	29.41	35.69
	21.35	21.41	31.12	28.74	28.90
28dias	18.13	22.11	31.26	29.32	40.66
	20.05	23.43	31.62	30.61	38.75
	18.41	24.92	28.17	30.58	38.41

15 M - NaOH - CC

Quadro 6.21. – Resultados Individuais dos Ensaios à Compr. Simples

<i>Idade</i>	<i>Comp. 0</i>	<i>Comp. 1</i>	<i>Comp. 2</i>	<i>Comp. 3</i>	<i>Comp. 4</i>
7dias	10.89	15.04	19.62	22.03	28.20
	9.38	17.94	18.97	20.93	28.85
	10.61	19.42	18.66	24.13	26.42
14dias	15.91	19.28	21.24	29.69	35.80
	16.19	18.21	18.92	28.47	37.68
	15.40	17.65	22.37	27.14	36.31
28dias	17.11	20.22	22.08	36.93	40.87
	17.56	18.81	23.18	32.35	42.56
	16.64	16.60	23.99	31.47	36.07

18 M - NaOH - SC

Quadro 6.22. - Resultados Individuais dos Ensaios à Compr. Simples

<i>Idade</i>	<i>Comp. 0</i>	<i>Comp. 1</i>	<i>Comp. 2</i>	<i>Comp. 3</i>	<i>Comp. 4</i>
7dias	14.28	16.87	17.93	23.43	28.40
	14.54	15.18	19.31	18.41	29.24
	13.41	15.77	18.55	19.42	30.19
14dias	17.16	27.98	31.22	33.81	45.26
	15.92	26.86	27.82	36.90	39.45
	17.12	28.01	26.01	37.82	35.44
28dias	17.87	21.71	27.10	34.37	38.27
	18.30	23.15	26.83	34.38	38.86
	15.52	21.66	26.21	34.43	36.97

II - Tracção por Flexão

12 M - NaOH - SC

Quadro 6.23. - Resultados Individuais dos Ensaios à Tracção

<i>Idade</i>	<i>Comp.0</i>	<i>Comp.1</i>	<i>Comp.2</i>	<i>Comp.3</i>	<i>Comp.4</i>
7dias	1.82	2.54	3.31	2.42	2.30
	1.85	2.43	3.03	2.42	2.33
	1.61	2.57	2.45	2.37	2.56
14dias	3.21	2.16	2.58	2.26	3.46
	2.86	3.44	2.91	2.30	2.84
	3.16	1.65	2.67	2.00	3.14
28dias	3.07	4.23	3.58	3.53	3.25
	3.00	3.55	3.55	3.74	3.04
	3.07	4.78	3.58	3.81	(*)

(*) - Um dos provetes rompeu-se antes do ensaio

12 M - NaOH - CC

Quadro 6.24. - Resultados Individuais dos Ensaios à Tracção

<i>Idade</i>	<i>Comp.0</i>	<i>Comp.1</i>	<i>Comp.2</i>	<i>Comp.3</i>	<i>Comp.4</i>
7 dias	2.21	2.87	2.28	4.23	3.30
	2.07	2.75	2.12	2.79	3.17
	2.16	3.04	2.70	3.39	3.68
14 dias	3.32	4.46	3.87	5.45	4.96
	2.82	3.44	4.13	5.80	4.91
	2.98	3.02	4.63	5.18	5.07
28 dias	2.70	3.65	4.88	5.60	5.32
	3.11	3.39	4.84	5.36	5.71
	2.65	3.46	4.60	5.15	4.90

15 M - NaOH - SC

Quadro 6.25. - Resultados Individuais dos Ensaios à Tracção

<i>Idade</i>	<i>Comp.0</i>	<i>Comp.1</i>	<i>Comp.2</i>	<i>Comp.3</i>	<i>Comp.4</i>
7 dias	2.33	2.26	2.77	3.25	4.25
	2.15	1.88	3.11	3.09	4.06
	2.34	2.33	2.77	2.97	3.86
14 dias	3.39	5.13	5.18	5.26	6.40
	3.67	4.48	5.31	4.85	6.47
	3.62	4.67	4.74	5.01	5.73
28 dias	4.20	5.96	5.64	5.85	6.43
	3.02	5.29	5.29	6.43	7.07
	3.42	5.08	5.18	5.75	7.44

15 M - NaOH - CC

Quadro 6.26. - Resultados Individuais dos Ensaios à Tracção

<i>Idade</i>	<i>Comp.0</i>	<i>Comp.1</i>	<i>Comp.2</i>	<i>Comp.3</i>	<i>Comp.4</i>
7dias	2.70	3.81	3.11	4.14	4.67
	2.74	3.53	3.86	4.51	4.30
	2.70	3.65	4.50	4.76	4.67
14dias	3.42	3.12	3.15	5.33	5.62
	2.58	3.37	2.97	5.01	5.96
	3.18	3.00	3.28	5.09	5.21
28dias	2.92	3.47	3.71	4.46	6.64
	3.08	3.20	3.19	4.31	6.27
	3.14	2.78	3.93	4.03	5.81

18 M - NaOH - SC

Quadro 6.27. - Resultados Individuais dos Ensaios à Tracção

<i>Idade</i>	<i>Comp.0</i>	<i>Comp.1</i>	<i>Comp.2</i>	<i>Comp.3</i>	<i>Comp.4</i>
7dias	2.14	3.24	3.11	4.32	4.57
	2.34	3.37	2.99	3.74	3.83
	2.39	2.88	3.23	4.50	3.97
14dias	2.65	4.90	5.87	6.84	6.70
	3.16	4.78	6.03	5.62	6.31
	2.97	4.20	6.01	6.15	7.17
28dias	3.54	3.83	4.55	5.48	5.82
	3.60	3.65	4.71	5.64	5.52
	3.23	3.99	5.11	5.12	6.47

6.6.3 - Cálculo dos Intervalos de Variação (Activador Simples)

Os quadros de cálculo seguintes mostram para cada série de resultados a média aritmética, os valores máximos e mínimos, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

A.1) 12M - NaOH - Sem Cal - Compressão Simples

7dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	8.44	8.87	7.91	0.49	5.80%
Comp.1	12.46	13.78	11.51	1.18	9.47%
Comp.2	14.72	15.18	14.12	0.54	3.67%
Comp.3	17.31	18.49	15.69	1.45	8.38%
Comp.4	18.34	18.72	17.87	0.43	2.34%

14dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	13.42	13.53	13.25	0.15	1.12%
Comp.1	14.43	15.01	13.98	0.53	3.67%
Comp.2	15.30	16.36	14.17	1.10	7.19%
Comp.3	13.88	14.70	13.41	0.71	5.12%
Comp.4	19.76	20.23	19.14	0.56	2.83%

28dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	19.28	19.64	18.66	0.54	2.80%
Comp.1	22.69	26.32	20.29	3.20	14.10%
Comp.2	20.06	20.74	19.53	0.62	3.09%
Comp.3	20.05	21.24	18.88	1.18	5.89%
Comp.4	24.33	25.70	22.19	1.88	7.73%

A.2) 12M - NaOH - Sem Cal - Tracção por Flexão

7dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	1.76	1.85	1.61	0.13	7.39%
Comp.1	2.51	2.57	2.43	0.07	2.79%
Comp.2	2.93	3.31	2.45	0.44	15.02%
Comp.3	2.40	2.42	2.37	0.03	1.25%
Comp.4	2.40	2.56	2.30	0.14	5.83%

14dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	3.08	3.21	2.86	0.19	6.17%
Comp.1	2.42	3.44	1.65	0.92	38.02%
Comp.2	2.72	2.91	2.58	0.17	6.25%
Comp.3	2.19	2.30	2.00	0.16	7.31%
Comp.4	3.15	3.46	2.84	0.31	9.84%

28dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	3.05	3.07	3.00	0.04	1.31%
Comp.1	4.19	4.78	3.55	0.62	14.80%
Comp.2	3.57	3.58	3.55	0.02	0.56%
Comp.3	3.69	3.81	3.53	0.15	4.07%
Comp.4	3.15	3.25	3.04	(*)	(*)

(*) - só dois resultados por ruptura de um provete

A.3) Intervalos de Variação

Com estes resultados determinaram-se os intervalos de variação a 90%, com recurso à distribuição t de Student, de acordo com a expressão (A) atrás indicada. Não pareceu necessário determinar os intervalos em todas as idades, considerando-se bastante, como é convencional na tecnologia do betão, fazê-lo apenas para os 28 dias. De facto, em termos práticos, os valores de referência são normalmente considerados aos 28 dias, interessando por isso verificar qual o intervalo de variação em que se pode esperar que caibam 90% dos resultados.

A.3.1) 12M-NaOH-SC-28d - Compressão simples

Quadro 6.28 - Intervalos de Variação

<i>Composições</i>	<i>média</i>	<i>S</i>	<i>s.t</i>	<i>intervalo</i>
Comp.0	19.28	0.54	1.58	$17.70 \leq x \leq 20.86$
Comp.1	22.69	3.20	9.34	$13.35 \leq x \leq 32.03$
Comp.2	20.06	0.52	1.52	$18.54 \leq x \leq 21.58$
Comp.3	20.05	1.18	3.45	$16.60 \leq x \leq 23.50$
Comp.4	24.33	1.88	5.49	$18.84 \leq x \leq 29.82$

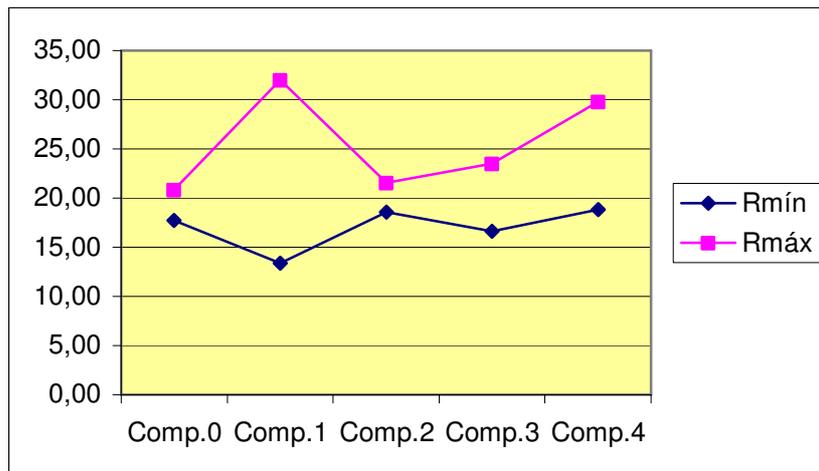


Fig. 6.57. - Intervalos de Variação a 90% - Compr. Simples

A.3.2) 12M-NaOH-SC-28d - Tracção por flexão

Quadro 6.29 - Intervalos de Variação

Composições	média	S	s.t	intervalo
Comp.0	3.05	0.04	0.12	$2.93 \leq x \leq 3.17$
Comp.1	4.19	0.62	1.81	$2.38 \leq x \leq 6.00$
Comp.2	3.57	0.02	0.06	$3.51 \leq x \leq 3.63$
Comp.3	3.69	0.15	0.44	$3.25 \leq x \leq 4.13$
Comp.4	3.15	(*)	(*)	(*)

(*) valores não obtidos

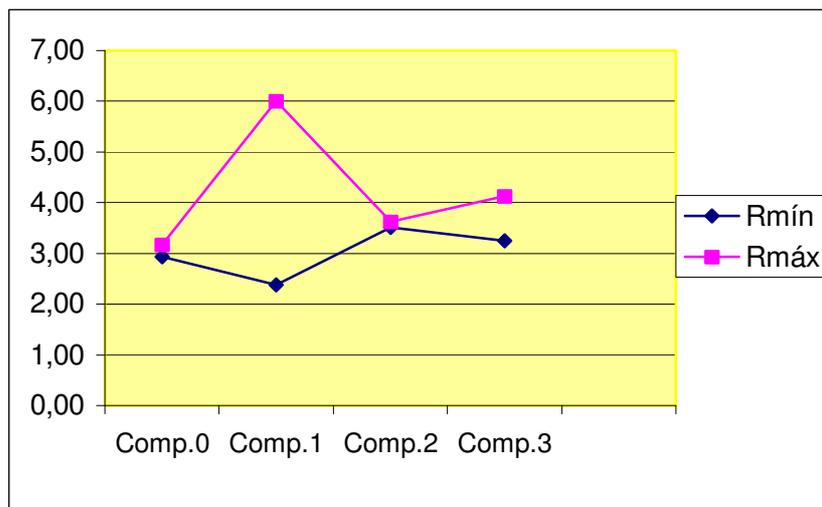


Fig. 6.58. - Intervalos de Variação a 90% - Tracção

A.3.3) - Resistências Mínimas com 95% de Probabilidade

Por definição do conceito de distribuição de frequência, em cada caso o valor inferior do intervalo de variação é igualado ou excedido em 95% dos casos. Os gráficos seguintes espelham essa evolução.

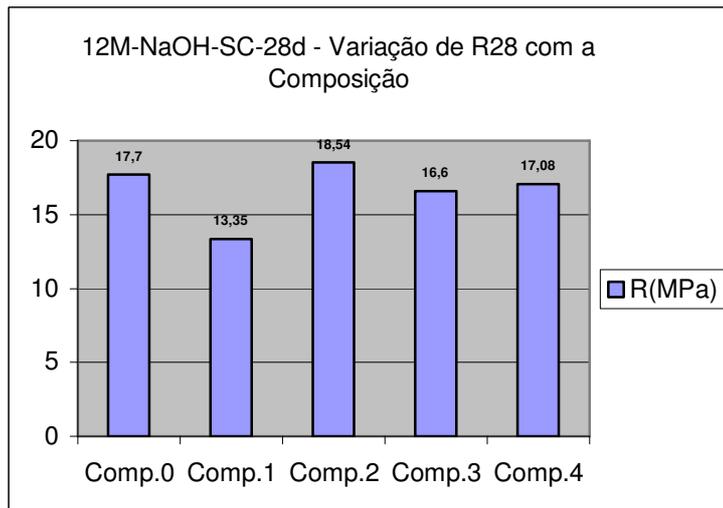


Fig. 6.59. - Compressão Simples (Valores mínimos com 95%)

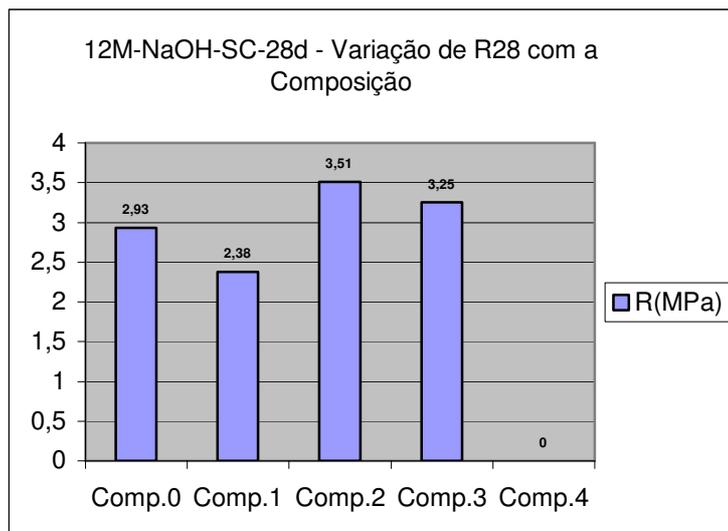


Fig. 6.60. - Tração por Flexão (Valores mínimos com 95%)

B.1) 12M - NaOH - Com Cal - Compressão Simples**7dias:**

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	11.11	12.49	10.30	1.20	10.80%
Comp.1	12.21	12.35	11.98	0.20	1.64%
Comp.2	11.69	11.87	11.56	0.16	1.37%
Comp.3	19.22	20.26	17.46	1.53	7.96%
Comp.4	23.54	25.13	22.61	1.39	5.90%

14dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	14.79	16.45	13.52	1.50	10.14%
Comp.1	17.36	19.78	15.86	2.12	12.21%
Comp.2	23.12	24.69	21.33	1.69	7.31%
Comp.3	30.24	32.94	27.97	2.51	8.30%
Comp.4	29.23	30.47	28.01	1.23	4.21%

28dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	14.92	15.41	14.54	0.44	2.95%
Comp.1	19.99	20.54	19.33	0.61	3.05%
Comp.2	26.86	27.67	25.65	1.07	3.98%
Comp.3	30.57	32.32	28.29	2.07	6.77%
Comp.4	49.12	51.69	46.24	2.74	5.58%

B.2) 12M - NaOH - Com Cal - Tracção por Flexão**7dias:**

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	2.15	2.21	2.07	0.07	3.26%
Comp.1	2.89	3.04	2.75	0.15	5.19%
Comp.2	2.37	2.70	2.12	0.30	12.66%
Comp.3	3.47	4.23	2.79	0.72	20.75%
Comp.4	3.38	3.68	3.17	0.27	7.99%

14dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	3.04	3.32	2.82	0.26	8.55%
Comp.1	3.64	4.46	3.02	0.74	20.33%
Comp.2	4.21	4.63	3.87	0.39	9.26%
Comp.3	5.48	5.80	5.18	0.31	5.66%
Comp.4	4.98	5.07	4.91	0.08	1.61%

28dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	2.82	3.11	2.65	0.25	8.87%
Comp.1	3.50	3.65	3.39	0.13	3.71%
Comp.2	4.77	4.88	4.60	0.15	3.14%
Comp.3	5.37	5.60	5.15	0.23	4.28%
Comp.4	5.31	5.71	4.90	0.41	7.72%

B.3) Intervalos de Variação

Com estes resultados determinaram-se os intervalos de variação a 90%, com recurso à distribuição *t* de Student. Como anteriormente não se determinaram os intervalos em todas as idades, considerando-se bastante, como é convencional na tecnologia do betão, fazê-lo apenas para os 28 dias.

B.3.1) 12M-NaOH-CC-28d - Compressão simples

Quadro 6.30 - Intervalos de Variação

Composições	média	s	s.t	Intervalo
Comp.0	14.92	0.44	1.28	$13.64 \leq x \leq 16.20$
Comp.1	19.99	0.61	1.78	$18.21 \leq x \leq 21.77$
Comp.2	26.86	1.07	3.12	$23.74 \leq x \leq 29.98$
Comp.3	30.57	2.07	6.04	$24.53 \leq x \leq 36.61$
Comp.4	49.12	2.74	8.00	$41.12 \leq x \leq 57.12$

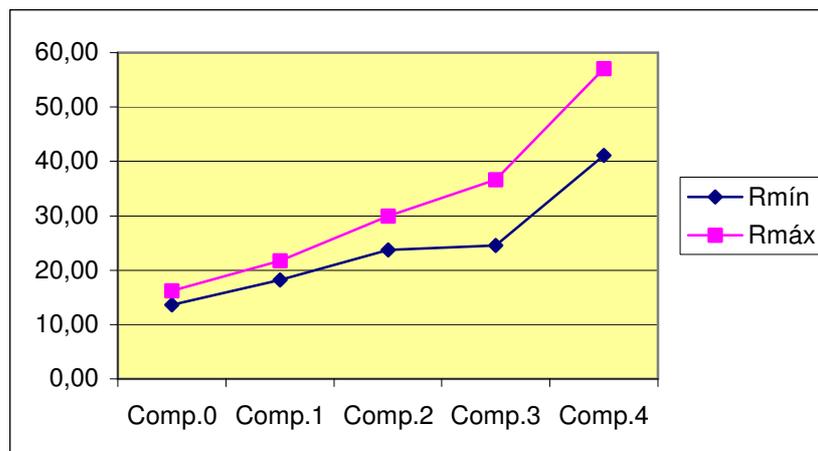


Fig. 6.61. - Intervalos de variação a 90% - Compr. Simples

B.3.2) - 12M-NaOH-SC-28d - Tracção por flexão

Quadro 6.31. - Intervalos de Variação

<i>Composições</i>	<i>média</i>	<i>S</i>	<i>s.t</i>	<i>intervalo</i>
Comp.0	2.82	0.25	0.73	$2.09 \leq x \leq 3.55$
Comp.1	3.50	0.13	0.38	$3.12 \leq x \leq 3.88$
Comp.2	4.77	0.15	0.44	$4.33 \leq x \leq 5.21$
Comp.3	5.37	0.23	0.67	$4.70 \leq x \leq 6.04$
Comp.4	5.31	0.41	1.20	$4.11 \leq x \leq 6.51$

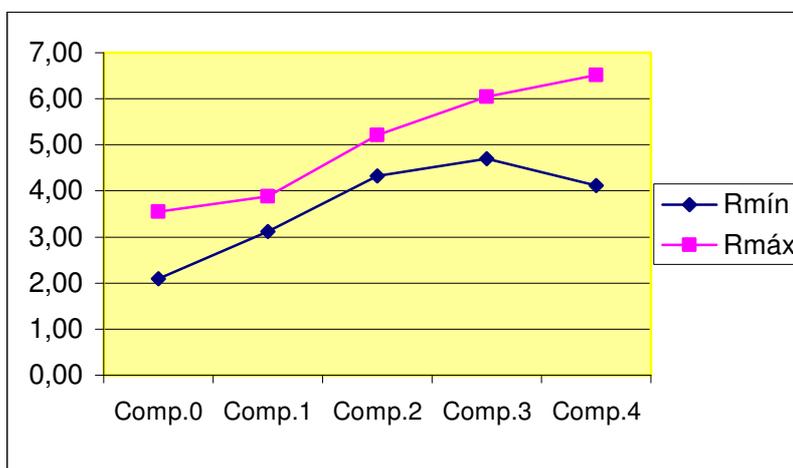


Fig. 6.62. - Intervalos de Variação a 90% - Tracção

B.3.3) – Resistências Mínimas com 95% de Probabilidade

Por definição do conceito de distribuição de frequência, em cada caso o valor inferior do intervalo de variação é igualado ou excedido em 95% dos casos. Os gráficos seguintes espelham essa evolução.

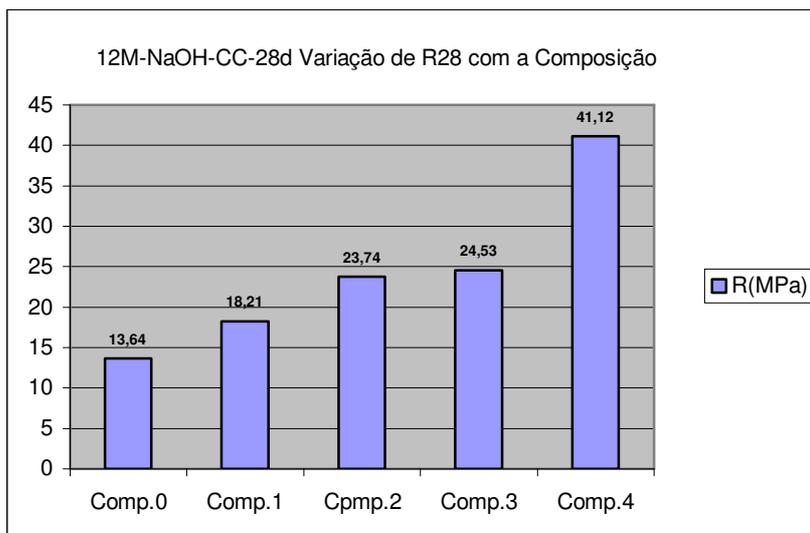


Fig. 6.63.- Compressão Simples (Valores mínimos com 95%)

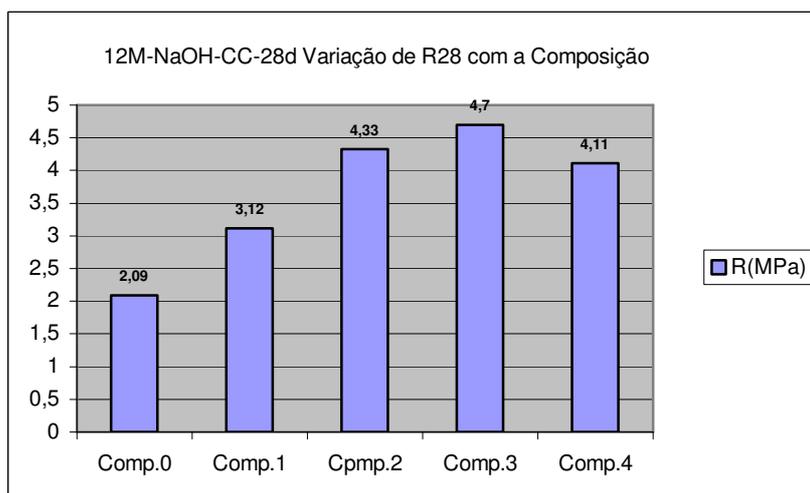


Fig. 6.64. - Tração por Flexão (Valores mínimos com 95%)

C.1) 15M - NaOH - Sem Cal - Compressão Simples

7dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	10.29	10.66	9.68	0.53	5.15%
Comp.1	14.34	14.98	13.39	0.84	5.86%
Comp.2	14.77	15.10	14.48	0.31	2.10%
Comp.3	18.51	19.62	17.01	1.35	7.29%
Comp.4	18.93	19.14	18.74	0.20	1.06%

14dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	20.00	21.35	18.64	1.36	6.80%
Comp.1	22.03	22.90	21.41	0.78	3.54%
Comp.2	29.68	31.57	26.35	2.89	9.74%
Comp.3	29.70	30.95	28.74	1.13	3.80%
Comp.4	32.62	35.69	28.90	3.44	10.55%

28dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	18.86\	20.05	18.13	1.04	5.51%
Comp.1	23.49	24.92	22.11	1.41	6.00%
Comp.2	30.35	31.62	28.17	1.90	6.26%
Comp.3	30.17	30.61	29.32	0.74	2.45%
Comp.4	39.27	40.66	38.41	1.21	3.08%

C.2) 15M - NaOH - Sem Cal - Tracção por Flexão**7dias:**

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	2.27	2.34	2.15	0.11	4.85%
Comp.1	2.16	2.33	1.88	0.24	11.11%
Comp.2	2.88	3.11	2.77	0.20	6.94%
Comp.3	3.10	3.25	2.97	0.14	4.52%
Comp.4	4.06	4.25	3.86	0.20	4.93%

14dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	3.56	3.62	3.39	0.15	4.21%
Comp.1	4.76	5.13	4.48	0.33	6.93%
Comp.2	5.08	5.31	4.74	0.30	5.91%
Comp.3	5.04	5.26	4.85	0.21	4.17%
Comp.4	6.20	6.47	5.73	0.41	6.61%

28dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	3.55	4.20	3.02	0.60	16.90%
Comp.1	5.44	5.96	5.08	0.46	8.46%
Comp.2	5.37	5.64	5.18	0.24	4.47%
Comp.3	6.01	6.43	5.75	0.37	6.16%
Comp.4	6.98	7.44	6.43	0.51	7.31%

C.3) Intervalos de Variação

Com estes resultados determinaram-se os intervalos de variação a 90%, com recurso à distribuição t de Student. Uma vez mais não pareceu necessário determinar os intervalos em todas as idades, considerando-se bastante, como é convencional na tecnologia do betão, fazê-lo apenas para os 28 dias.

C.3.1) 15M-NaOH-SC-28d - Compressão simples

Quadro 6.32. - Intervalos de Variação

Composições	Média	s	s.t	intervalo
Comp.0	18.86	1.04	3.04	$15.82 \leq x \leq 21.90$
Comp.1	23.49	1.41	4.12	$19.37 \leq x \leq 27.61$
Comp.2	30.35	1.90	5.55	$24.80 \leq x \leq 35.90$
Comp.3	30.17	0.74	2.16	$28.01 \leq x \leq 32.33$
Comp.4	39.27	1.21	3.53	$35.74 \leq x \leq 42.80$

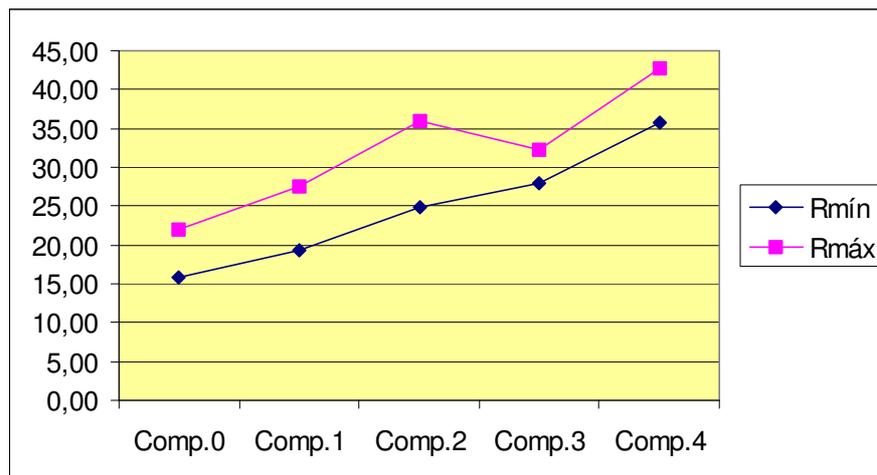


Fig. 6.65. - Intervalos de Variação a 90% - Compr.Simples

C.3.2) 15M-NaOH-SC-28d - Tracção por flexão

Quadro 6.33. - Intervalos de Variação

Composições	média	s	s.t	intervalo
Comp.0	3.55	0.60	1.75	$1.80 \leq x \leq 5.30$
Comp.1	5.44	0.46	1.34	$4.10 \leq x \leq 6.78$
Comp.2	5.37	0.24	0.70	$4.67 \leq x \leq 6.07$
Comp.3	6.01	0.37	1.08	$4.93 \leq x \leq 7.09$
Comp.4	6.98	0.51	1.49	$5.49 \leq x \leq 8.47$

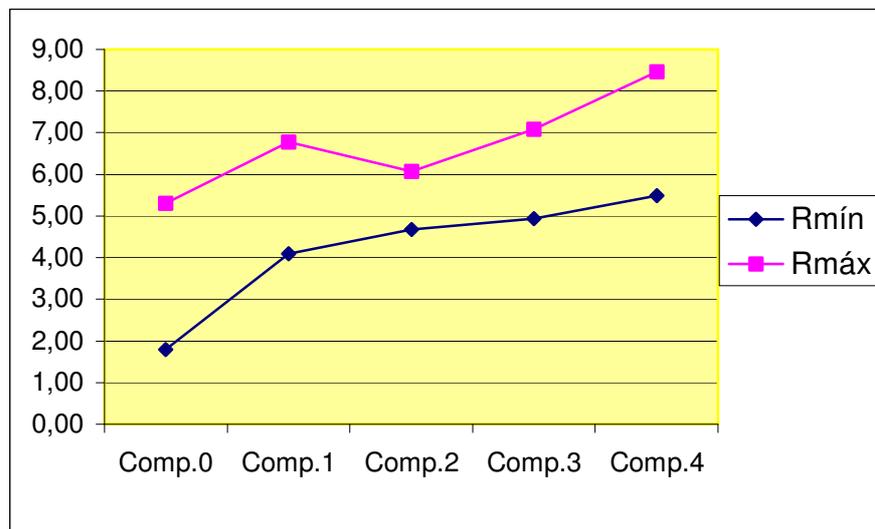


Fig. 6.66. - Intervalos de Variação a 90% - Tracção

C.3.3) - Resistências Mínimas com 95% de Probabilidade

Por definição do conceito de distribuição de frequência, em cada caso o valor inferior do intervalo de variação é igualado ou excedido em 95% dos casos. Os gráficos seguintes espelham essa evolução.

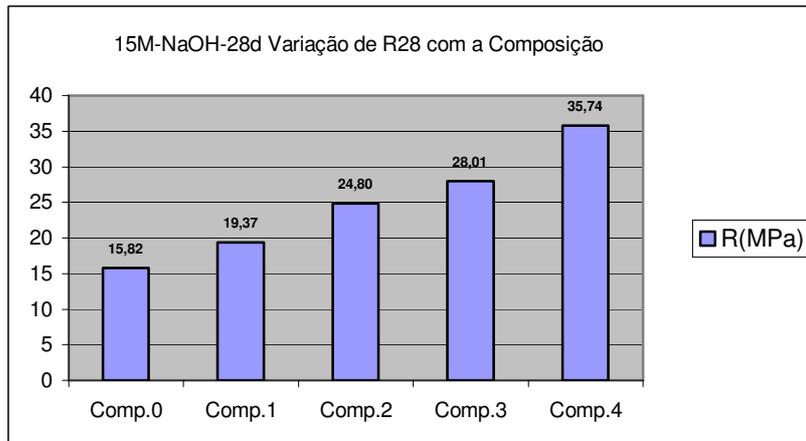


Fig. 6.67. - Compressão Simples (Valores mínimos com 95%)

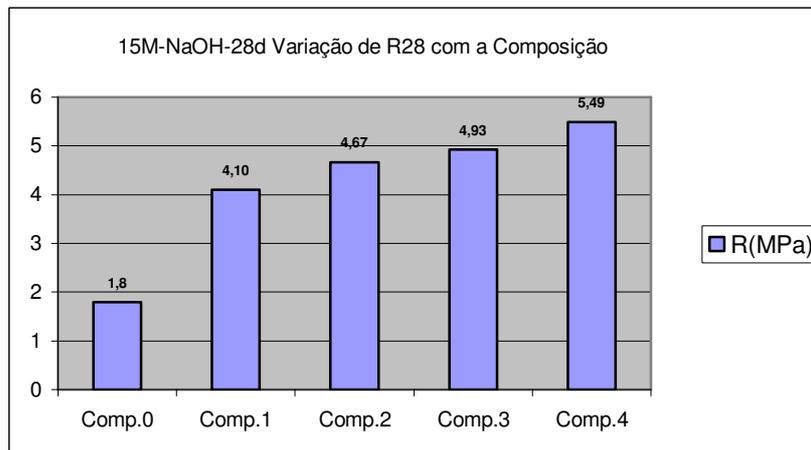


Fig. 6.68. - Tração por Flexão (Valores mínimos com 95%)

D.1) 15M - NaOH - Com Cal - Compressão Simples

7dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	10.29	10.89	9.38	0.80	7.77%
Comp.1	17.47	19.42	15.04	2.23	12.76%
Comp.2	19.08	19.62	18.66	0.49	2.57%
Comp.3	22.36	24.13	20.93	1.63	7.29%
Comp.4	27.82	28.85	26.42	1.26	4.53%

14dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	15.83	16.19	15.40	0.40	2.53%
Comp.1	18.38	19.28	17.65	0.83	4.51%
Comp.2	20.84	22.37	18.92	1.76	8.45%
Comp.3	28.43	29.69	27.14	1.27	4.47%
Comp.4	36.60	37.68	35.80	0.97	2.65%

28dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	17.10	17.56	16.64	0.46	2.69%
Comp.1	18.54	20.22	16.60	1.82	9.81%
Comp.2	23.08	23.99	22.08	0.96	4.16%
Comp.3	33.58	36.93	31.47	2.93	8.73%
Comp.4	39.83	42.56	36.07	3.37	8.46%

D.2) 15M - NaOH - Com Cal - Tracção por Flexão**7dias:**

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	2.71	2.74	2.70	0.02	0.70%
Comp.1	3.66	3.81	3.53	0.14	3.83%
Comp.2	3.82	4.50	3.11	0.70	18.32%
Comp.3	4.47	4.76	4.14	0.31	6.94%
Comp.4	4.55	4.67	4.30	0.21	4.62%

14dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	3.06	3.42	2.58	0.43	14.05%
Comp.1	3.16	3.37	3.00	0.19	6.01%
Comp.2	3.13	3.28	2.97	0.16	5.11%
Comp.3	5.14	5.33	5.01	0.17	3.31%
Comp.4	5.60	5.96	5.21	0.38	6.79%

28dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	3.05	3.14	2.92	0.11	3.61%
Comp.1	3.15	3.47	2.78	0.35	11.11%
Comp.2	3.61	3.93	3.19	0.38	10.53%
Comp.3	4.27	4.46	4.03	0.22	5.15%
Comp.4	6.24	6.64	5.81	0.42	6.73%

D.3) Intervalos de Variação

Com estes resultados determinaram-se os intervalos de variação a 90%, com recurso à distribuição t de Student, fazendo-o apenas para os 28 dias.

D.3.1) 15M-NaOH-CC-28d - Compressão simples

Quadro 6.34. - Intervalos de Variação

Composições	média	s	s.t	intervalo
Comp.0	17.10	0.46	1.34	$15.76 \leq x \leq 18.44$
Comp.1	18.54	1.82	5.31	$13.23 \leq x \leq 23.85$
Comp.2	23.08	0.96	2.80	$20.28 \leq x \leq 25.88$
Comp.3	33.58	2.93	8.56	$25.02 \leq x \leq 42.14$
Comp.4	39.83	3.37	9.84	$29.99 \leq x \leq 49.67$

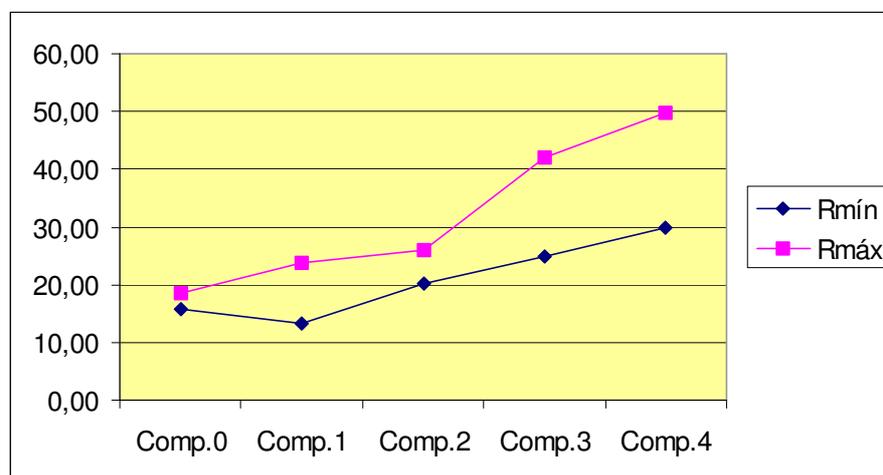


Fig. 6.69. - Intervalos de Variação a 90% - Compr. Simples

D.3.2) 15M-NaOH-CC-28d - Tracção por flexão

Quadro 6.35. - Intervalos de Variação

Composições	média	S	s.t	intervalo
Comp.0	3.05	0.11	0.32	$2.73 \leq x \leq 3.37$
Comp.1	3.15	0.35	1.02	$2.13 \leq x \leq 4.17$
Comp.2	3.61	0.38	1.11	$2.50 \leq x \leq 4.72$
Comp.3	4.27	0.22	0.64	$3.63 \leq x \leq 4.91$
Comp.4	6.24	0.42	1.23	$5.01 \leq x \leq 7.47$

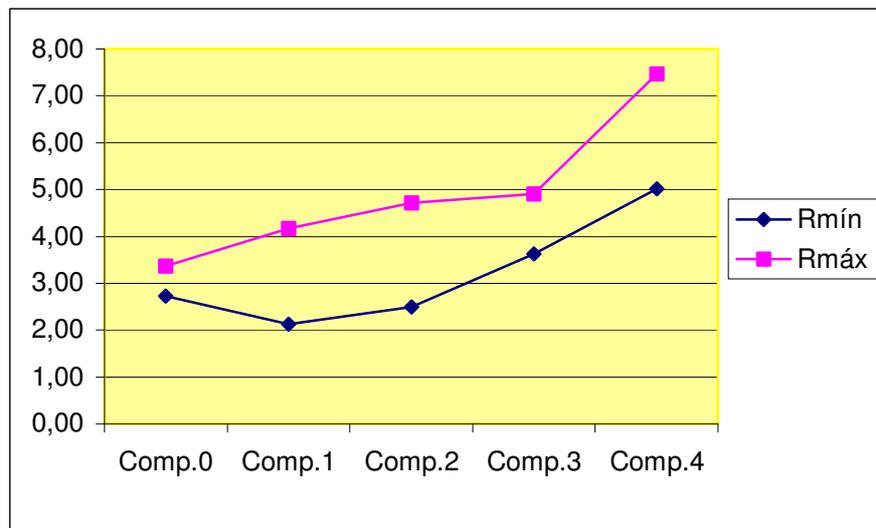


Fig. 6.70. - Intervalos de Variação a 90% - Tracção

D.3.3) - Resistências Mínimas com 95% de Probabilidade

Por definição do conceito de distribuição de frequência, em cada caso o valor inferior do intervalo de variação é igualado ou excedido em 95% dos casos. Os gráficos das figuras seguintes espelham essa evolução.

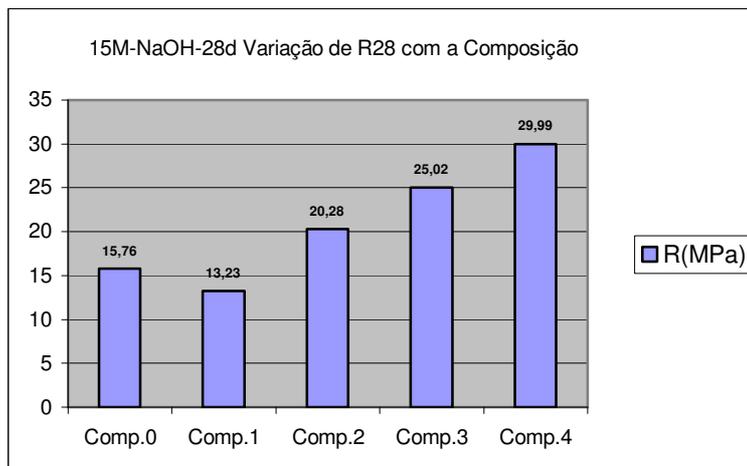


Fig. 6.71. - Compressão Simples (Valores mínimos com 95%)

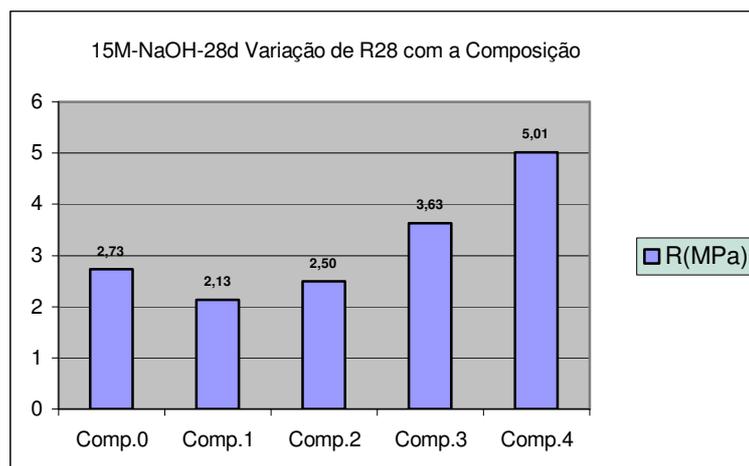


Fig. 6.72. - Tração por Flexão (Valores mínimos com 95%)

E.1) 18M - NaOH - Sem Cal - Compressão Simples

7dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	14.08	14.54	13.41	0.59	4.19%
Comp.1	15.94	16.87	15.18	0.86	5.40%
Comp.2	18.60	19.31	17.93	0.69	3.71%
Comp.3	20.42	23.43	18.41	2.66	13.03%
Comp.4	29.28	30.19	28.40	0.90	3.07%

14dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	16.73	17.12	15.92	0.70	4.18%
Comp.1	27.62	28.01	26.86	0.66	2.39%
Comp.2	28.35	31.23	26.01	2.65	9.35%
Comp.3	36.18	37.82	33.81	2.10	5.80%
Comp.4	40.05	45.26	35.44	4.94	12.33%

28dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	17.23	18.30	15.52	1.50	8.71%
Comp.1	22.17	23.15	21.66	0.85	3.83%
Comp.2	26.71	27.10	26.21	0.46	1.72%
Comp.3	34.39	34.43	34.37	0.03	0.08%
Comp.4	38.03	38.86	36.97	0.97	2.55%

E.2) 18M - NaOH - Sem Cal - Tracção por Flexão**7dias:**

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	2.29	2.39	2.14	0.13	5.68%
Comp.1	3.16	3.37	2.88	0.25	7.91%
Comp.2	3.11	3.23	2.99	0.12	3.86%
Comp.3	4.19	4.50	3.74	0.40	9.55%
Comp.4	4.12	4.57	3.83	0.39	9.47%

14dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	2.93	3.16	2.65	0.26	8.87%
Comp.1	4.63	4.90	4.20	0.37	7.99%
Comp.2	5.97	6.03	5.87	0.09	1.51%
Comp.3	6.20	6.84	5.62	0.61	9.84%
Comp.4	6.73	7.17	6.31	0.43	6.39%

28dias:

	Média	Máx.	Mín.	Dsv.Pad.	Coef.Var.
Comp.0	3.46	3.60	3.23	0.20	5.78%
Comp.1	3.82	3.99	3.65	0.17	4.45%
Comp.2	4.79	5.11	4.55	0.29	6.05%
Comp.3	5.41	5.64	5.12	0.27	4.99%
Comp.4	5.94	6.47	5.52	0.49	8.25%

E.3) Intervalos de Variação

Com estes resultados determinaram-se os intervalos de variação a 90%, com recurso à distribuição t de Student, uma vez mais para os 28 dias.

E.3.1) 18M-NaOH-SC-28d (Compressão simples)

Quadro 6.36. - Intervalos de Variação

Composições	média	s	s.t	intervalo
Comp.0	17.23	1.50	4.38	$12.85 \leq x \leq 21.61$
Comp.1	22.17	0.85	2.48	$19.69 \leq x \leq 24.65$
Comp.2	26.71	0.46	1.34	$25.37 \leq x \leq 28.05$
Comp.3	34.39	0.03	0.09	$34.30 \leq x \leq 34.48$
Comp.4	38.03	0.97	2.83	$35.20 \leq x \leq 40.86$

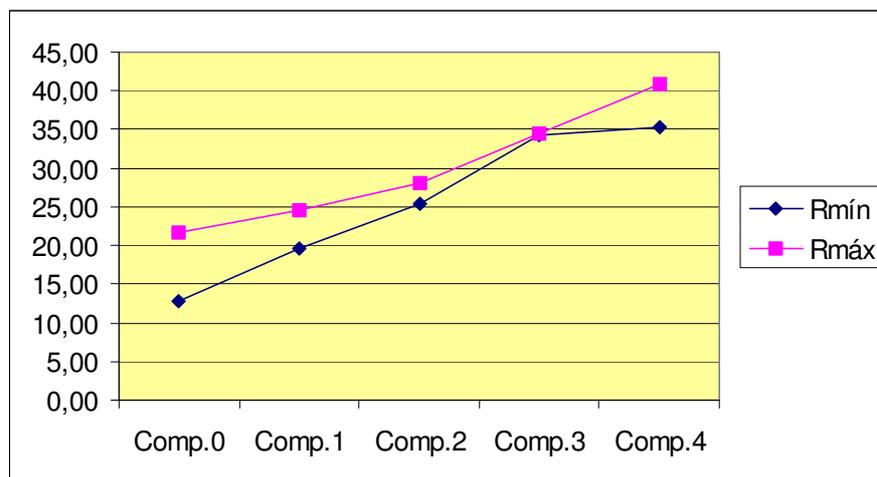


Fig. 6.73. - Intervalos de Variação a 90% - Compr. Simples

E.3.2) 18M-NaOH-SC-28d (Tracção por flexão)

Quadro 6.37. - Intervalos de Variação

Composições	média	s	s.t	intervalo
Comp.0	3.46	0.20	0.58	$2.80 \leq x \leq 4.04$
Comp.1	3.82	0.17	0.50	$3.32 \leq x \leq 4.32$
Comp.2	4.79	0.29	0.85	$3.94 \leq x \leq 5.64$
Comp.3	5.41	0.27	0.79	$4.62 \leq x \leq 6.20$
Comp.4	5.94	0.49	1.43	$4.51 \leq x \leq 7.37$

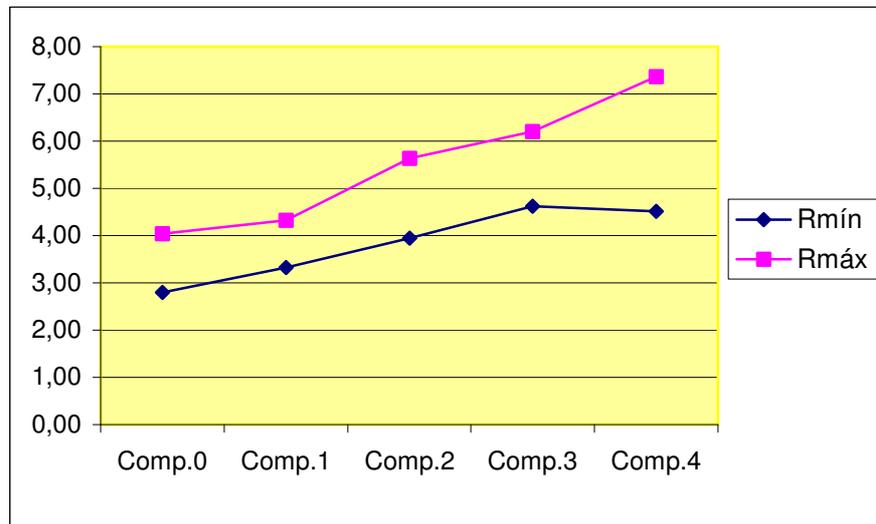


Fig. 6.74. - Intervalos de Variação a 90% - Tracção

E.3.3) – Resistências Mínimas com 95% de Probabilidade

Por definição do conceito de distribuição de frequência, em cada caso o valor inferior do intervalo de variação é igualado ou excedido em 95% dos casos. Os gráficos seguintes espelham essa evolução.

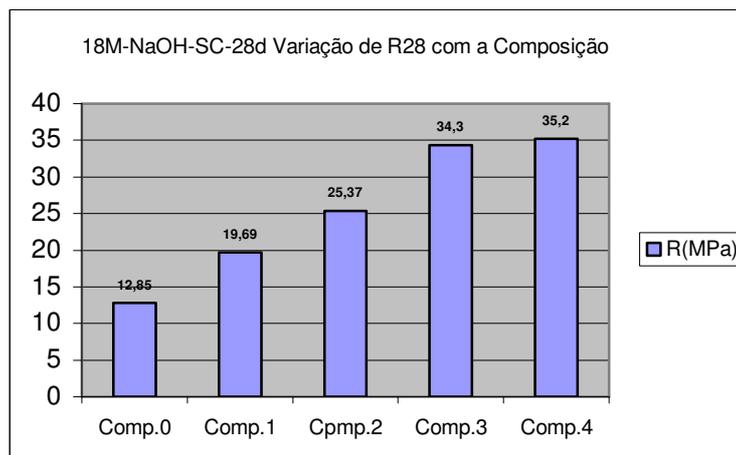


Fig. 6.75. - Compressão Simples (Valores mínimos com 95%)

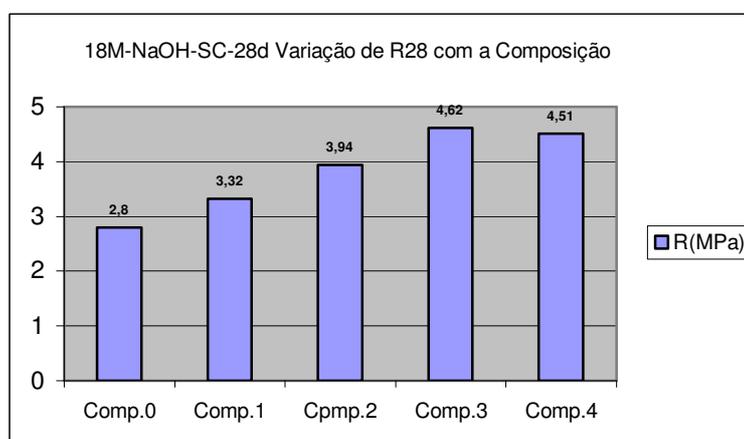


Fig. 6.76. - Tração por Flexão (Valores mínimos com 95%)

A conclusão principal da análise estatística que se acaba de apresentar é que todos os resultados dos ensaios caem dentro dos intervalos de variação calculados, o que indica consistência dos dados. Como é natural, verifica-se uma maior dispersão ao nível dos resultados de flexão, enquanto que nos resultados de compressão a dispersão se situa num nível que se pode considerar bastante bom, pelo que se poderá dizer que o caulino Mibal, sendo um caulino comercial sem grande nível de processamento, não parece influenciar os resultados finais.

De acordo com o Critério 2 de Conformidade para a resistência característica à compressão, definido na ENV 206, quando a conformidade é avaliada a partir de 3 ensaios, deverão satisfazer-se as relações seguintes:

$$X_{\text{med}(3)} \geq f_{\text{ck}} + 5$$

$$X_{\text{min}} \geq f_{\text{ck}} - 1$$

o que permite a elaboração do Quadro 6.38., onde se determinam em todas as situações de cálculo referidas os valores de f_{ck} obtidos por esta via, comparando-os com os valores estatísticos retirados dos gráficos acima. Esta análise é feita só para a compressão simples e consideram-se as resistências obtidas aos 28 dias, pois o critério definido na norma europeia só diz respeito às resistências a esta idade.

Quadro 6.38. - Valores Comparados das Resistências

	$X_{\text{med}(3)}$	X_{min}	f_{ck}	$R_{95\%}$
12M - SC	20.06	19.53	15.06	18.54
12M - CC	26.86	25.65	21.86	23.74
15M - SC	30.35	28.17	25.35	24.80
15M - CC	23.08	22.08	18.08	20.28
18M - SC	26.71	26.21	21.71	25.37

Como se esperava, as resistências características máximas f_{ck} obtidas de acordo com o critério de conformidade da ENV 206 são, de um modo geral, mais conservadoras que as obtidas por uma análise estatística elaborada com um número reduzido de dados. É de esperar que aumentando o número de ensaios se verifique uma aproximação entre os dois valores.

6.6.4. Quadros de Resultados (Activador Composto)

I – Compressão Simples

Os Quadros seguintes apresentam os valores individuais R_i dos ensaios à compressão simples efectuados sobre 2 composições de argamassa e 2 composições de geobetão seleccionadas para a análise estatística, bem como o

valor da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação que vão servir para elaborar a análise. Para cada ensaio foram executados 6 provetes, curados à temperatura ambiente até à data do ensaio, apenas envolvidos em filme de polietileno.

Composição Base CBB (argamassa)

Quadro 6.39. - Resistências à Compr. Simples

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	Média	Dv.Pad.	C.Var.
7 dias	53.45	51.17	55.46	53.11	49.95	53.64	52.80	1.95	3.69%
14 dias	62.15	60.73	59.18	58.55	61.12	58.52	60.04	1.51	2.51%
28 dias	59.70	63.05	63.12	58.74	59.56	57.95	60.35	2.21	3.66%

Composição Base CBD (argamassa)

Quadro 6.40. - Resistências à Compr. Simples

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	Média	Dv.Pad.	C.Var.
7 dias	47.44	46.58	45.60	42.51	43.81	45.98	45.32	1.83	4.04%
14 dias	43.59	48.52	48.01	46.31	45.27	46.35	46.34	1.80	3.88%
28 dias	45.63	46.11	49.56	48.13	47.70	45.40	47.09	1.64	3.48%

Geobetão GB

Quadro 6.41. - Resistências à Compr. Simples

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	Média	Dv.Pad.	C.Var.
7 dias	51.64	54.11	57.36	55.54	53.40	52.71	54.13	2.06	3.81%
14 dias	66.01	63.49	62.33	62.01	64.27	60.98	63.18	1.80	2.85%
28 dias	58.47	62.54	59.68	60.60	63.07	64.29	61.44	2.22	3.61%

Geobetão GE

Quadro 6.42. - Resistências à Compr. Simples

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	Média	Dv.Pad.	C.Var.
7 dias	71.69	72.15	72.03	68.78	69.45	71.84	70.99	1.48	2.08%
14 dias	79.76	78.31	75.27	78.02	74.92	79.03	77.55	2.00	2.58%
28 dias	79.17	77.66	79.30	76.19	75.47	76.07	77.31	1.66	2.15%

II – Flexo-Tracção

De igual modo, os quadros seguintes apresentam agora os valores individuais dos ensaios de flexo-tracção efectuados sobre as mesmas amostras de argamassa e de geobetão que no ensaio anterior, incluindo-se a determinação dos mesmos parâmetros estatísticos (média, desvio-padrão e coeficiente de variação).

Composição Base CBB (argamassa)

Quadro 6.43. - Resistências à Tracção

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	Média	Dv.Pad.	C.Var.
7 dias	5.39	5.62	6.10	6.97	5.47	5.84	5.90	0.59	10.00%
14 dias	6.31	6.32	9.98	6.73	8.82	7.74	7.65	1.50	9.60%
28 dias	9.15	7.77	8.51	10.60	9.21	7.61	8.81	1.10	12.49%

Composição Base CBD (argamassa)

Quadro 6.44. - Resistências à Tracção

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	Média	Dv.Pad.	C.Var.
7 dias	4.69	5.22	5.01	5.92	5.40	4.85	5.18	0.44	8.49%
14 dias	5.13	5.42	4.96	5.24	4.93	5.78	5.24	0.32	6.11%
28 dias	5.15	4.87	5.71	6.60	5.31	5.82	5.58	0.61	10.93%

Geobetão GB

Quadro 6.45. - Resistências à Tracção

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	Média	Dv.Pad.	C.Var.
7 dias	5.49	7.26	7.37	6.17	5.81	6.12	6.37	0.77	12.09%
14 dias	7.14	7.54	6.98	6.38	7.33	6.70	7.01	0.42	5.99%
28 dias	6.58	6.13	6.31	6.54	6.62	7.19	6.56	0.36	5.49%

Geobetão GE

Quadro 6.46. – Resistências à Tracção

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	Média	Dv.Pad.	C.Var.
7 dias	7.30	6.69	7.23	6.66	6.72	7.09	6.95	0.29	4.17%
14 dias	7.24	7.76	8.03	7.10	6.99	7.59	7.45	0.41	5.50%
28 dias	7.27	7.42	6.51	6.70	7.16	7.68	7.12	0.44	6.18%

Os valores R_i referem-se, como é evidente, aos resultados individuais de cada um dos 6 provetes ensaiados.

6.6.5. Cálculo dos Intervalos de Variação (Activador Composto)

De um modo geral, as distribuições das tensões são mais regulares, apresentando coeficientes de variação que se têm de considerar baixos, principalmente no domínio das resistências à compressão simples. Como era de esperar, nas resistências à tracção por flexão verifica-se uma maior dispersão dos resultados. É curioso o facto de em algumas situações os valores das resistências de tracção obtidos nas argamassas serem superiores aos valores do geobetão.

Nas argamassas, a superfície de contacto entre a matriz cimentícia e os agregados (areia) é consideravelmente maior do que nos geobetões, pelo que, confirmando-se a possibilidade de incorporação (parcial?) das areias nos mecanismos de activação alcalina, poderá estar aqui a explicação não só para alguns valores mais elevados, em tracção, que as argamassas apresentam em relação aos geobetões, mas também para os próprios valores em si, que são elevados.

A) Intervalos de Variação

Da mesma forma que nos activadores simples, a análise dos intervalos de variação a 90% foi feita com base na distribuição *t de Student*, dada a pequena

dimensão da amostra e na expressão (A) que define o intervalo de variação. Igualmente se considerou que era desnecessário determinar os intervalos para todas as idades, seleccionando-se a idade dos 28 dias por ser a mais convencional, se bem que com os geopolímeros, como ao longo deste trabalho se comprovou, se possa considerar a idade dos 7 dias como a idade chave para as resistências.

Compressão simples

Quadro 6.47. - Intervalos de Variação

<i>Composições</i>	<i>média</i>	<i>S</i>	<i>s.t</i>	<i>intervalo</i>
CBB	60.35	2.21	4.45	$55.90 \leq x \leq 64.80$
CBD	47.09	1.64	3.30	$43.79 \leq x \leq 50.39$
GB	61.44	2.22	4.47	$56.97 \leq x \leq 65.91$
GE	77.31	1.66	3.34	$73.97 \leq x \leq 80.65$

Estas composições não são comparáveis senão duas a duas, pelo que não tem sentido a sua representação gráfica conjunta. Verifica-se que o intervalo de variação dos valores é muito mais apertado, considerando o nível das resistências mecânicas que estão em causa. Todavia, e curiosamente, os intervalos não se sobrepõem nem entre as argamassas nem entre os geobetões, circunstância que individualiza e particulariza os resultados. A gama de valores obtidos parece assim ser específica de cada tipo de material.

Tracção por flexão

Quadro 6.48. - Intervalos de Variação

<i>Composições</i>	<i>média</i>	<i>S</i>	<i>s.t</i>	<i>Intervalo</i>
CBB	8.81	1.10	2.22	$6.59 \leq x \leq 11.03$
CBD	5.58	0.61	1.23	$4.35 \leq x \leq 6.81$
GB	6.56	0.36	0.73	$5.83 \leq x \leq 7.29$
GE	7.12	0.44	0.89	$6.23 \leq x \leq 8.01$

Verifica-se aqui alguma sobreposição dos intervalos, em resultado de uma maior dispersão a nível das resistências em tracção, pelo que os resultados não são tão bem definidos para cada tipo de material.

B) Resistências Mínimas com 95% de Probabilidade

Por definição do conceito de intervalo de variação a 90%, pode dizer-se que 5% dos valores são inferiores ao valor mínimo do intervalo e 5% estarão acima do valor máximo, pelo que 90% dos valores esperados cairão dentro do intervalo. Portanto, é legítimo afirmar que o valor inferior do intervalo de variação é igualado ou excedido em 95% dos casos. Os gráficos seguintes indicam os valores mínimos das resistências com a probabilidade de 95% para cada tipo de material.

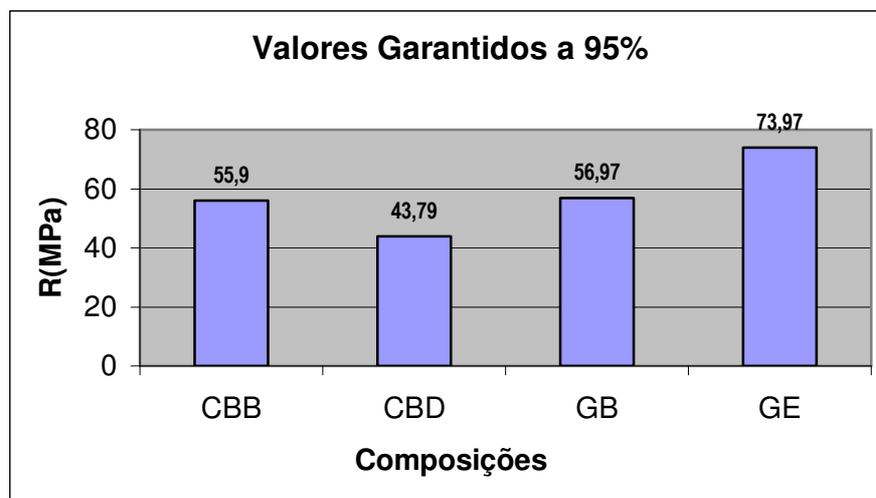


Fig. 6.77. - Compressão Simples (Valores mínimos com 95%)

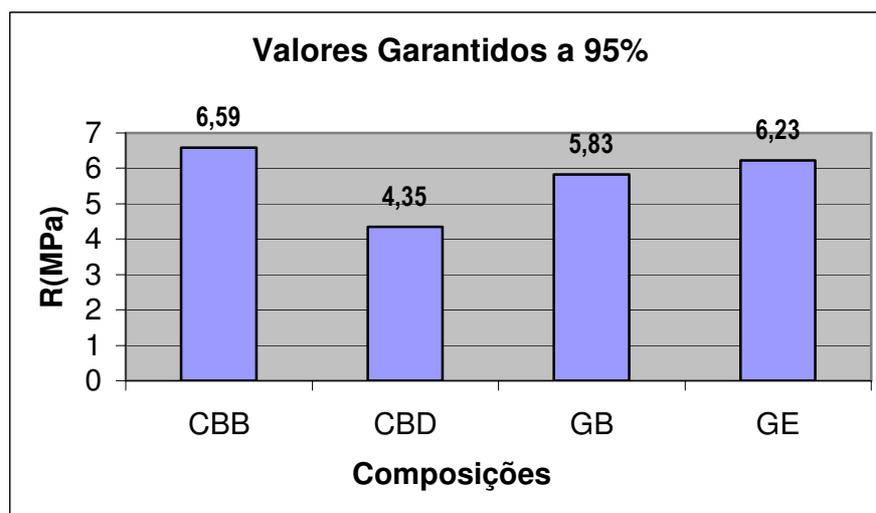


Fig. 6.78. - Tração por Flexão (Valores mínimos com 95%)

Como se vê, nas resistências à compressão simples o valor garantido a 95% dos geobetões é sempre superior ao das argamassas, situando-se acima dos 57 MPa e, no caso da composição GE, alcançando valores que na prática dos betões de CPN já são considerados como de elevado desempenho. Nas resistências à tracção o maior valor garantido a 95% é numa argamassa, situando-se o valor dos geobetões por volta dos 6 MPa.