



Escola de Ciências e Tecnologia

# **Influência do tipo de cimento na retração**

**Carlos André Melo Poêjo**

Dissertação para a obtenção do grau de mestre em  
**Engenharia Civil**

Orientador: Doutor António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro

*“Este trabalho foi realizado com o apoio da Fundação para a  
Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito do projecto  
PTDC/ECM/105075/2008”*

**Outubro de 2011**





Dissertação para a obtenção do grau de mestre em  
**Engenharia Civil**

## **Influência do tipo de cimento na retração**

Autor: Carlos André Melo Poêjo

Orientador: Doutor António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro

*“Este trabalho foi realizado com o apoio da Fundação para a  
Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito do projecto  
PTDC/ECM/105075/2008”*



Para todos aqueles que sempre acreditaram que conseguia. Obrigado.



# Agradecimentos

Muitos intervenientes tornaram possível tornar um desejo num facto concreto que é a realização deste trabalho, quer directamente quer indirectamente.

Em primeiro lugar ao Engenheiro Bettencourt Ribeiro que, desde o primeiro email em que lhe solicitei disponibilidade para me orientar e sugestões para temas foi incansável e sempre disposto a ajudar e incentivar.

Por sua vez o LNEC mostrou-se tal e qual como a instituição respeitável e na vanguarda da engenharia que é, estando à altura das exigências laboratoriais do tema deste trabalho, assim como no potencial humano e acima de tudo sempre com um método quer laboratorial quer burocrático pronto e eficaz para fazer face às barreiras que foram surgindo. É uma honra poder ter sido acolhido nesta instituição.

Agradeço toda a sabedoria e amizade prestadas pelo Sr. Balsinha e pelo Sr. Gil Rosa e a Sr<sup>a</sup> Carolina Rego ao longo de todos os meses de trabalho laboratorial, a energia por eles cedida ajudou-me a enfrentar os dias mais cinzentos.

A todos os outros técnicos e engenheiros do LNEC, um obrigado pelo acolhimento e simpatia.

Às cimenteiras Secil e Cimpor, à Ibera, na pessoa da ex. colega Eng<sup>a</sup>. Margarida Faria, um muito obrigado pelo apoio cedido no material experimental.

Aos meus amigos e colegas Pedro Tavares, Carla Costa, Xavier Prazeres o meu sincero e profundo agradecimento quer pelos anos que me deram o prazer de partilhar com eles a vida de estudante quer pelo partilhar das viagens e dias de laboratório, foram eles a minha bússola ao longo de todo este trabalho.

Ao meu amigo e colega Paulo Ferreira, pelos conselhos e amizade que soube dar-me nos momentos de dúvida e impasse.

À minha namorada Sara Valverde, que sempre soube e sabe ouvir-me nos momentos mais difíceis e que sempre me apoiou em todas as decisões. Obrigado.

A todos os amigos que partilharam estes anos comigo e me fizeram ser melhor em todos os aspectos.

Por fim, aos meus pais, Helena Melo e João Poêjo, que sempre acreditaram em mim e nas minhas capacidades e sempre tiveram um sorriso e uma palavra de apoio em todos os momentos. Obrigado.



# Resumo

Actualmente, o desenvolvimento de betões de elevada resistência e desempenho tornou-se um mercado emergente, principalmente no que se refere a superestruturas.

Neste tipo de Betões é utilizada uma razão de água/cimento bastante reduzida, que pode ser inferior a 0,30 por cento. A este nível de razão água/cimento os materiais cimentícios possuem tendência agravada a desenvolver fissuração devido ao processo denominado por retração autogénea.

Neste trabalho é apresentado um estudo comparativo de pastas, com diferentes tipos de adições e percentagens das mesmas, observando-se o seu comportamento face a este fenómeno.

Tendo ainda em conta a relação comprovada entre retração autogénea e a retração química, estudou-se também este fenómeno, assim como o tempo de presa e a resistência à compressão e à flexão.

Foi observado o efeito de redução da retracção autogénea com o uso de cinzas volantes, assim como do metacaulino, tendo no entanto esta ultima adição um comportamento menos evidente.

**Palavras-chave:** Retração autogénea, fissuração, adições, retração química.



# Abstract

Currently, the development of high strength and performance concrete has become an emerging market, especially as regards the superstructure.

In this type of concrete is used a ratio of water / cement rather low, may be less than 0.30 percent. At this level of water / cement ratio cementitious materials have exacerbated the tendency to develop cracks due to process called autogenous shrinkage.

It is presented in this paper a comparative study of pastes with different types of additions and percentages of them, observing their behavior in the face of this phenomenon.

Also taking into account the proven link between autogenous shrinkage and chemical shrinkage, was also studied this phenomenon and the time to rush and resistance to compression and bending.

We observed the reducing effect in autogenous shrinkage phenomena, by using fly ash and metakaolin, wherever, this last addition as a less obvious behavior.

**Keywords:** autogenous shrinkage, cracking, additions, Chemical Shrinkage



# Índice

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL.....	1
1.2. OBJETIVO .....	1
1.3. METODOLOGIA .....	2
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
<b>2. TIPOS DE RETRAÇÃO</b> .....	<b>3</b>
2.1. RETRAÇÃO AUTOGÉNEA .....	3
2.1.1: <i>Estado Líquido da Pasta:</i> .....	5
2.1.2: <i>Formação do esqueleto sólido:</i> .....	5
2.1.3: <i>Fase sólida:</i> .....	6
2.2. RETRAÇÃO QUÍMICA.....	8
2.3. RELAÇÃO ENTRE A RETRAÇÃO QUÍMICA E RETRAÇÃO AUTOGÉNEA.....	9
2.4. PROCESSOS DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....	10
<b>3. MATERIAIS UTILIZADOS</b> .....	<b>13</b>
3.1. CIMENTO .....	13
3.2. AREIA .....	15
3.3. ADJUVANTE- GLENIUM 26 SCC - SUPER PLASTIFICANTE .....	15
3.4. ÁGUA. ....	16
3.5. ADIÇÕES. ....	16
3.5.1. <i>Cinzas Volantes.</i> .....	17
3.5.2. <i>Metacaulino.</i> .....	18
3.5.3. <i>Sílica de Fumo.</i> .....	19
3.5.4. <i>Filér Calcário.</i> .....	19
<b>4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>21</b>
4.1. PREPARAÇÃO DAS PASTAS .....	21
4.2. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....	23
4.2.1. <i>Determinação da Retração Autogénea</i> .....	23
4.2.2. <i>Ensaio de determinação do tempo de presa</i> .....	28
4.2.3. <i>Ensaio de determinação da retração química.</i> .....	29
4.3. ENSAIOS EM ESTADO ENDURECIDO.....	32
4.3.1. <i>Ensaio de resistência à compressão e à flexão</i> .....	32
<b>5. RESULTADOS DA RETRAÇÃO AUTOGÉNEA</b> .....	<b>37</b>
5.1. PASTA REFERÊNCIA SECIL PADRÃO .....	38
5.2. PASTA SECIL + CINZAS VOLANTES 15% .....	40
5.3. PASTA SECIL + CINZAS VOLANTES 30% .....	42
5.4. PASTA SECIL + METACAUANO 10% .....	44
5.5. PASTA SECIL + METACAUANO 20%.....	46
5.6. PASTA SECIL + SILICA DE FUMO 5% .....	48
5.7. PASTA SECIL + SILICA DE FUMO 10% .....	50
5.8. PASTA SECIL + FILER CALCÁRIO 15%.....	52
5.9. PASTA SECIL + FILER CALCÁRIO 30%.....	54

5.10. PASTA REFERÊNCIA CIMPOR PADRÃO .....	56
5.11. PASTA CIMPOR + CINZAS VOLANTES 15% .....	58
5.12. PASTA CIMPOR + CINZAS VOLANTES 30% .....	60
5.13. PASTA CIMPOR + METACAULINO 10% .....	62
5.14. PASTA CIMPOR + METACAULINO 20% .....	64
5.15. PASTA CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 5% .....	66
5.16. PASTA CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 10% .....	68
5.17. PASTA CIMPOR + FILÉR CALCÁRIO 15% .....	70
5.18. PASTA CIMPOR + FILÉR CALCÁRIO 30% .....	72
<b>6. ANÁLISE COMPARATIVA DA RETRAÇÃO AUTOGÊNEA.....</b>	<b>75</b>
6.1. PASTA REFERÊNCIA SECIL E PASTA DE REFERÊNCIA CIMPOR.....	76
6.2. PASTA REFERÊNCIA SECIL E DIFERENTES ADIÇÕES E PERCENTAGENS .....	78
6.2.1 Pasta referência Secil + cinzas volantes 15 e 30% .....	80
6.2.2.Pasta referência Secil + metacaulino 10 e 20% .....	82
6.2.3.Pasta referência Secil + sílica de fumo 5 e 10% .....	84
6.2.4.Pasta referência Secil + Filer Calcário 15 e 30%.....	86
6.3. PASTA REFERÊNCIA CIMPOR E DIFERENTES ADIÇÕES E PERCENTAGENS .....	88
6.3.1 Pasta referência Cimpor + cinzas volantes 15 e 30% .....	90
6.3.2 Pasta referência Cimpor + Metacaulino 10 e 20% .....	92
6.3.3 Pasta referência Cimpor + Sílica de Fumo 5 e 10% .....	95
6.3.4. Pasta referência Cimpor + Filer Calcário 15 e 30% .....	97
6.4. COMPARAÇÃO ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO COM OS CIMENTOS COM SUBSTITUIÇÃO DE CINZAS VOLANTES, ÀS 24, 100 E 500 HORAS .....	99
6.5. COMPARAÇÃO ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO COM OS CIMENTOS COM SUBSTITUIÇÃO DE METACAULINO, ÀS 24, 100 E 500 HORAS.....	101
6.6. COMPARAÇÃO ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO COM OS CIMENTOS COM SUBSTITUIÇÃO DE SÍLICA DE FUMO, ÀS 24, 100 E 500 HORAS .....	103
6.7. COMPARAÇÃO ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO COM OS CIMENTOS COM SUBSTITUIÇÃO DE FILER CALCÁRIO, ÀS 24, 100 E 500 HORAS .....	105
<b>7.COMPARAÇÃO COM A RETRAÇÃO QUÍMICA .....</b>	<b>107</b>
7.1. SECIL PADRÃO.....	108
7.2. SECIL + CINZAS VOLANTES 15% .....	108
7.3. SECIL + CINZAS VOLANTES 30% .....	108
7.4. SECIL + METACAULINO 10%.....	109
7.5. SECIL + METACAULINO 20%.....	109
7.6. SECIL + SÍLICA DE FUMO 5% .....	109
7.7. SECIL + SÍLICA DE FUMO 10% .....	110
7.8. SECIL + FILER CALCÁRIO 15% .....	110
7.9. SECIL + FILER CALCÁRIO 30% .....	110
7.10. CIMPOR PADRÃO.....	111
7.11. CIMPOR + CINZAS VOLANTES 15% .....	111
7.12. CIMPOR + CINZAS VOLANTES 30% .....	111
7.13. CIMPOR + METACAULINO 10% .....	112
7.14. CIMPOR + METACAULINO 20% .....	112
7.15. CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 5%.....	112
7.16. CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 10%.....	113
7.17. CIMPOR + FILER CALCÁRIO 15% .....	213
7.18. CIMPOR + FILER CALCÁRIO 30% .....	213

<b>8.CONCLUSÕES .....</b>	<b>115</b>
<b>9.SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>117</b>
<b>10. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>123</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>A.1</b>
<b>RESULTADOS DO ENSAIO DE TEMPO DE PRESA SEGUNDO A NORMA NP EN 196-3 .....</b>	<b>A.2</b>
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>A.3</b>
<b>RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 .....</b>	<b>A.4</b>





# Índice de Figuras

FIG. 1: DIAGRAMA DE TIPOS DE RETRAÇÃO E ESTÁGIOS DE ACTUAÇÃO .....	3
FIG. 2: EVOLUÇÃO DA RETRAÇÃO AUTOGÉNEA EM FUNÇÃO DO GRAU DE HIDRATAÇÃO [ACKER 1988]. .....	6
FIG. 3: RETRAÇÃO QUÍMICA EM CIMENTOS [TAZAWA 1999] .....	8
FIG. 4. RELAÇÃO ENTRE A RETRAÇÃO QUÍMICA E A RETRAÇÃO AUTOGÉNEA. [TAZAWA 1999] .....	9
FIG 5: EVOLUÇÃO DA HIDRATAÇÃO NO CIMENTO [KRONLÖF 1999] .....	10
FIG. 6: DISTRIBUIÇÃO DE CORPOS SÓLIDOS E POROS NA PASTA DE CIMENTO HIDRATADA [MEHTA & MONTEIRO]. .....	10
FIG. 7: TENSÕES QUE ATRAEM O MENISCO DA ÁGUA ENTRE 2 PARTÍCULAS, DEVIDO A TRANSFERÊNCIA DE MASSA E DESENVOLVIMENTO DA PRESSÃO CAPILAR [RADOCEA 1992].....	11
FIG. 8:ILUSTRAÇÃO DA DEFINIÇÃO DE VOLUME APARENTE E ABSOLUTO [TAZAWA 1999] .....	12
FIG. 9: AREIA UTILIZADA EM LABORATÓRIO. ....	15
FIG. 10 E 11: GLENIUM 26 SCC, ASPECTO DO RECIPIENTE E ASPECTO DO MATERIAL.....	16
FIG. 12. MISTURADOR.....	22
FIG. 13. RECIPIENTE DO MISTURADOR .....	22
FIG.14. PÁ MISTURADORA .....	22
FIG. 15: MESA VIBRATÓRIA.....	24
FIG. 16: TUBOS DE POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE.....	24
FIG. 17: TAMPA E SUPORTE PARA MOLDAGEM .....	25
FIG. 18: SUPORTE COM DILATÓMETRO E DEFLETÓMETRO.....	25
FIG. 19: BARRA PADRÃO DE AÇO .....	25
FIG. 20: RECIPIENTE PARA CONSERVAÇÃO DOS PROVETES .....	25
FIG. 21. RESINA EPOXY.....	26
FIG. 22. FUNIL .....	26
FIG. 23. VENTONHA .....	26
FIG. 24: MOLDE DE VICAT .....	28
FIG. 25: PRESSÓMETRO AUTOMÁTICO.....	28
FIG. 26. FRASCOS .....	29
FIG. 27. PIPETA COM TUBO .....	29
FIG. 28: SERINGA.....	30
FIG. 29: BALANÇA .....	30
FIG. 30. ROLHA COM TUBO GRADUADO .....	30
FIG. 31. PARAFINA LIQUIDA .....	30
FIG. 32. MOLDE PARA COLOCAÇÃO DO CONJUNTO .....	30

FIG. 33 CONJUNTO DO ENSAIO .....	31
FIG. 34. MÁQUINA ENSAIO À RESISTÊNCIA À FLEXÃO E COMPRESSÃO .....	32
FIG. 35. INÍCIO ENSAIO À FLEXÃO .....	32
FIG. 36: MOLDE PARA PROVETES .....	33
FIG. 37: RÉGUA DE REGULARIZAÇÃO.....	33
FIG. 38: VIDRO .....	33
FIG. 39: ARMÁRIO.....	33
FIG. 40. APARELHO DO ENSAIO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	34

# Índice de Gráficos

GRÁFICO 1: EXTENSÃO ABSOLUTA SECIL PADRÃO .....	38
GRÁFICO 2: EXTENSÃO FIM DE PRESA SECIL PADRÃO (LEITURAS AUTOMÁTICAS) .....	38
GRÁFICO 3: EXTENSÃO TANGENTE NULA SECIL PADRÃO .....	39
GRÁFICO 5: EXTENSÃO FIM DE PRESA SECIL + CINZAS VOLANTES 15% (LEITURAS AUTOMÁTICAS).....	40
GRÁFICO 4: EXTENSÃO ABSOLUTA SECIL + CINZAS VOLANTES 15%.....	40
GRÁFICO 6: EXTENSÃO TANGENTE NULA SECIL + CINZAS VOLANTES 15%.....	41
GRÁFICO 7: EXTENSÃO ABSOLUTA SECIL + CINZAS VOLANTES 30%.....	42
GRÁFICO 8: EXTENSÃO FIM DE PRESA SECIL CINZAS VOLANTES 30% (LEITURAS AUTOMÁTICAS) .....	42
GRÁFICO 9: EXTENSÃO TANGENTE NULA SECIL + CINZAS VOLANTES 30%.....	43
GRÁFICO 10: EXTENSÃO ABSOLUTA SECIL +METACAULINO 10%.....	44
GRÁFICO 11: EXTENSÃO FIM DE PRESA SECIL + METACAULINO 10% (LEITURAS AUTOMÁTICAS) .....	44
GRÁFICO 12: EXTENSÃO TANGENTE NULA SECIL + METACAULINO 10% .....	45
GRÁFICO 13: EXTENSÃO ABSOLUTA SECIL + METACAULINO 20% .....	46
GRÁFICO 14: EXTENSÃO FIM DE PRESA SECIL + METACAULINO 20% (LEITURAS AUTOMÁTICAS) .....	46
GRÁFICO 15: EXTENSÃO TANGENTE NULA SECIL + METACAULINO 20% .....	47
GRÁFICO 16: EXTENSÃO ABSOLUTA SECIL + SÍLICA DE FUMO 5%.....	48
GRÁFICO 17: EXTENSÃO FIM DE PRESA SECIL + SÍLICA DE FUMO 5% (LEITURAS AUTOMÁTICAS) .....	48
GRÁFICO 18: EXTENSÃO TANGENTE NULA SECIL + SÍLICA DE FUMO 5% .....	49
GRÁFICO 20: EXTENSÃO FIM DE PRESA SECIL + SÍLICA DE FUMO 10% (LEITURAS AUTOMÁTICAS) .....	50
GRÁFICO 19: EXTENSÃO ABSOLUTA SECIL + SÍLICA DE FUMO 10% .....	50
GRÁFICO 21: EXTENSÃO TANGENTE NULA SECIL + SÍLICA DE FUMO 10% .....	51
GRÁFICO 22: EXTENSÃO ABSOLUTA SECIL + FILER CALCÁRIO 15%.....	52
GRÁFICO 23: EXTENSÃO FIM DE PRESA SECIL + FILER CALCÁRIO 15% (LEITURAS AUTOMÁTICAS).....	52
GRÁFICO 24: EXTENSÃO TANGENTE NULA SECIL + FILER CALCÁRIO 15%.....	53
GRÁFICO 25: EXTENSÃO ABSOLUTA SECIL + FILER CALCÁRIO 30%.....	54
GRÁFICO 26: EXTENSÃO FIM DE PRESA SECIL + FILER CALCÁRIO 30% (LEITURAS AUTOMÁTICAS).....	54
GRÁFICO 27: EXTENSÃO TANGENTE NULA SECIL + FILER CALCÁRIO 30%.....	55
GRÁFICO 29: EXTENSÃO FIM DE PRESA CIMPOR PADRÃO (LEITURAS AUTOMÁTICAS) .....	56
GRÁFICO 28: EXTENSÃO ABSOLUTA CIMPOR PADRÃO .....	56
GRÁFICO 30: EXTENSÃO TANGENTE NULA CIMPOR PADRÃO.....	57
GRÁFICO 31: EXTENSÃO ABSOLUTA CIMPOR + CINZAS VOLANTES 15%.....	58
GRÁFICO 32: EXTENSÃO FIM DE PRESA CIMPOR+ CINZAS VOLANTES 15% (LEITURAS AUTOMÁTICAS) 58	
GRÁFICO 33: EXTENSÃO TANGENTE NULA CIMPOR+ CINZAS VOLANTES 15%.....	59

GRÁFICO 34: EXTENSÃO ABSOLUTA CIMPOR + CINZAS VOLANTES 30% .....	60
GRÁFICO 35: EXTENSÃO FIM DE PRESA CIMPOR + CINZAS VOLANTES 30% (LEITURAS AUTOMÁTICAS) .....	60
GRÁFICO 36: EXTENSÃO TANGENTE NULA CIMPOR + CINZAS VOLANTES 30% .....	61
GRÁFICO 37: EXTENSÃO ABSOLUTA CIMPOR + METACAUULINO 10% .....	62
GRÁFICO 38: EXTENSÃO FIM DE PRESA CIMPOR + METACAUULINO 10% (LEITURAS AUTOMÁTICAS) ....	62
GRÁFICO 39: EXTENSÃO TANGENTE NULA CIMPOR + METACAUULINO 10% .....	63
GRÁFICO 40: EXTENSÃO ABSOLUTA CIMPOR + METACAUULINO 20% .....	64
GRÁFICO 41: EXTENSÃO FIM DE PRESA CIMPOR + METACAUULINO 20% (LEITURAS AUOMÁTICAS) .....	64
GRÁFICO 42: EXTENSÃO TANGENTE NULA CIMPOR + METACAUULINO 20% .....	65
GRÁFICO 43: EXTENSÃO ABSOLUTA CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 5% .....	66
GRÁFICO 44: EXTENSÃO FIM DE PRESA CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 5% (LEITURAS AUTOMÁTICAS) ....	66
GRÁFICO 45: EXTENSÃO TANGENTE NULA CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 5% .....	67
GRÁFICO 46: EXTENSÃO ABSOLUTA CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 10% .....	68
GRÁFICO 47: EXTENSÃO FIM DE PRESA CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 10% (LEITURAS AUTOMÁTICAS) ..	68
GRÁFICO 48: EXTENSÃO TANGENTE NULA CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 10% .....	69
GRÁFICO 49: EXTENSÃO ABSOLUTA CIMPOR + FILER CALCÁRIO 15% .....	70
GRÁFICO 50: EXTENSÃO FIM DE PRESA CIMPOR + FILER CALCÁRIO 15% (LEITURAS AUTOMÁTICAS) ...	70
GRÁFICO 51: EXTENSÃO TANGENTE NULA CIMPOR + FILER CALCÁRIO 15% .....	71
GRÁFICO 52: EXTENSÃO ABSOLUTA CIMPOR + FILER CALCÁRIO 30% .....	72
GRÁFICO 53: EXTENSÃO FIM DE PRESA CIMPOR + FILER CALCÁRIO 30% (LEITURAS AUTOMÁTICAS) ...	72
GRÁFICO 54: EXTENSÃO TANGENTE NULA CIMPOR + FILER CALCÁRIO. 30% .....	73
GRÁFICO 55: EXTENSÕES TANGENTES NULAS SECIL + CIMPOR .....	76
GRÁFICO 56: EXTENSÕES TANGENTES NULAS SECIL+ CIMPOR (ESCALA LOGARÍTMICA) .....	76
GRÁFICO 57: EXTENSÕES TANGENTES NULAS SECIL .....	78
GRÁFICO 58: EXTENSÕES TANGENTES NULAS SECIL (ESCALA LOGARÍTMICA) .....	78
GRÁFICO 59: EXTENSÕES TANGENTES NULAS SECIL + CINZAS VOLANTES .....	80
GRÁFICO 60: EXTENSÕES TANGENTES NULAS SECIL + CINZAS VOLANTES (ESCALA LOGARÍTMICA) .....	80
GRÁFICO 62: EXTENSÕES TANGENTES NULAS SECIL+ METACAUULINO (ESCALA LOGARÍTMICA) .....	82
GRÁFICO 61: EXTENSÕES TANGENTES NULAS SECIL+ METACAUULINO .....	82
GRÁFICO 63: EXTENSÕES TANGENTES NULAS SECIL+ SÍLICA DE FUMO .....	84
GRÁFICO 64: EXTENSÕES TANGENTES NULAS SECIL+ SÍLICA DE FUMO (ESCALA LOGARITMICA) .....	84
GRÁFICO 66: EXTENSÕES TANGENTES NULAS SECIL+ FILER CALCÁRIO (ESCALA LOGARITMICA) .....	86
GRÁFICO 65: EXTENSÕES TANGENTES NULAS SECIL+ FILER CALCÁRIO .....	86
GRÁFICO 67: EXTENSÕES TANGENTES NULAS CIMPOR .....	88

GRÁFICO 68: EXTENSÕES TANGENTES NULAS CIMPOR (ESCALA LOGARÍTMICA) .....	88
GRÁFICO 69: EXTENSÕES TANGENTES NULAS CIMPOR+ CINZAS VOLANTES.....	90
GRÁFICO 70: EXTENSÕES TANGENTES NULAS CIMPOR+ CINZAS VOLANTES (ESCALA LOGARÍTMICA) ..	90
GRÁFICO 71: EXTENSÕES TANGENTES NULAS CIMPOR + METACAULINO .....	92
GRÁFICO 72: EXTENSÕES TANGENTES NULAS CIMPOR + METACAULINO (ESCALA LOGARÍTMICA) .....	92
GRÁFICO 73: EXTENSÕES TANGENTES NULAS CIMPOR+ SÍLICA DE FUMO .....	95
GRÁFICO 74: EXTENSÃO TANGENTES NULAS CIMPOR + SÍLICA DE FUMO (ESCALA LOGARÍTMICA).....	95
GRÁFICO 75: EXTENSÕES TANGENTES NULAS CIMPOR + FILER CALCÁRIO.....	97
GRÁFICO 76: EXTENSÕES TANGENTES NULAS CIMPOR + FILER CALCÁRIO (ESCALA LOGARÍTMICA) .....	97



# Índice de Quadros

QUADRO 1: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS CIMENTOS UTILIZADOS .....	14
QUADRO 2: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS CIMENTOS UTILIZADOS: COMPOSIÇÃO BOGUE .....	14
QUADRO 3: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS CIMENTOS UTILIZADOS: COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO RIETVELD E COMPOSIÇÃO BOGUE DO CIMENTO SECIL .....	14
QUADRO 4: DADOS TÉCNICOS GLENIUM 26 SCC .....	16
QUADRO 5: ENSAIOS QUÍMICOS CINZAS VOLANTES .....	17
QUADRO 6: ENSAIOS QUÍMICOS CINZAS VOLANTES FORNECIDOS PELO FABRICANTE .....	18
QUADRO 8: ENSAIOS QUÍMICOS SÍLICA DE FUMO .....	19
QUADRO 9: ENSAIOS QUÍMICOS FILER CALCÁRIO .....	20
QUADRO 10: DOSAGENS DAS PASTAS PREPARADAS .....	23
QUADRO 11: DIFERENCIAL ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO E AS EXTENSÕES COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR CINZAS VOLANTES ÀS 24 HORAS. ....	99
QUADRO 12: DIFERENCIAL ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO E AS EXTENSÕES COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR CINZAS VOLANTES ÀS 100 HORAS. ....	99
QUADRO 13: DIFERENCIAL ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO E AS EXTENSÕES COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR CINZAS VOLANTES ÀS 500 HORAS. ....	99
QUADRO 14: DIFERENCIAL ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO E AS EXTENSÕES COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR METACAUULINO ÀS 24 HORAS. ....	101
QUADRO 15: DIFERENCIAL ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO E AS EXTENSÕES COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR METACAUULINO ÀS 100 HORAS. ....	101
QUADRO 16: DIFERENCIAL ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO E AS EXTENSÕES COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR METACAUULINO ÀS 500 HORAS. ....	101
QUADRO 17: DIFERENCIAL ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO E AS EXTENSÕES COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR SÍLICA DE FUMO ÀS 24 HORAS. ....	103
QUADRO 18: DIFERENCIAL ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO E AS EXTENSÕES COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR SÍLICA DE FUMO ÀS 100 HORAS. ....	103
QUADRO 19: DIFERENCIAL ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO E AS EXTENSÕES COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR SÍLICA DE FUMO ÀS 500 HORAS. ....	103
QUADRO 20: DIFERENCIAL ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO E AS EXTENSÕES COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR FILER CALCÁRIO ÀS 24 HORAS. ....	105
QUADRO 21: DIFERENCIAL ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO E AS EXTENSÕES COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR FILER CALCÁRIO ÀS 100 HORAS. ....	105
QUADRO 22: DIFERENCIAL ENTRE AS EXTENSÕES DOS CIMENTOS PADRÃO E AS EXTENSÕES COM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO POR FILER CALCÁRIO ÀS 500 HORAS. ....	105
QUADRO 23: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÉNEA: SECIL PADRÃO .....	108
QUADRO 24: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÉNEA: SECIL + CINZAS VOLANTES 15% .....	108
QUADRO 25: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÉNEA: SECIL + CINZAS VOLANTES 30% .....	108

QUADRO 26: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: SECIL + METACAU LINO 10% .....	109
QUADRO 27: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: SECIL + METACAU LINO 20% .....	109
QUADRO 28: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: SECIL + SÍLICA DE FUMO 5% .....	109
QUADRO 29: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: SECIL + SÍLICA DE FUMO 10% ...	110
QUADRO 30: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: SECIL + FILER CALCÁRIO 15% ....	110
QUADRO 31: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: SECIL + FILER CALCÁRIO 30% ....	110
QUADRO 32: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: CIMPOR PADRÃO.....	111
QUADRO 33: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: CIMPOR + CINZAS VOLANTES 15% .....	111
QUADRO 34: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: CIMPOR + CINZAS VOLANTES 30% .....	111
QUADRO 35: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: CIMPOR + METACAU LINO 10%	112
QUADRO 36: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: CIMPOR + METACAU LINO 20%	112
QUADRO 37: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 5% .....	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.12
QUADRO 38: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 10% .....	113
QUADRO 39: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: CIMPOR + FILER CALCÁRIO 15%	213
QUADRO 40: RELAÇÃO ENTRE RETRAÇÃO QUÍMICA E AUTOGÊNEA: CIMPOR + FILER CALCÁRIO 30%	213



# Índice de Quadros em anexo

QUADRO A.1. RESULTADOS DO ENSAIO DE TEMPO DE PRESA SEGUNDO A NORMA NP EN 196-3 .....	A.2
QUADRO A.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA SECIL PADRÃO .....	A.4
QUADRO A.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA SECIL + CINZAS VOLANTES 15% .....	A.4
QUADRO A.4. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA SECIL + CINZAS VOLANTES 30% .....	A.4
QUADRO A.5. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA SECIL + METACAUULINO 10% .....	A.5
QUADRO A.6. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA SECIL + METACAUULINO 20% .....	A.5
QUADRO A.7. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA SECIL + SÍLICA DE FUMO 5% .....	A.5
QUADRO A.8. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA SECIL + SÍLICA DE FUMO 10% .....	A.6
QUADRO A.9. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA SECIL + FILER CALCÁRIO 15% .....	A.6
QUADRO A.10. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA SECIL + FILER CALCÁRIO 30% .....	A.6
QUADRO A.11. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA CIMPOR PADRÃO .....	A.7
QUADRO A.12. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA CIMPOR + CINZAS VOLANTES 15% .....	A.7
QUADRO A.13. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA CIMPOR + CINZAS VOLANTES 30% .....	A.7
QUADRO A.14. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA CIMPOR + METACAUULINO 10% .....	A.8
QUADRO A.15. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA CIMPOR + METACAUULINO 20% .....	A.8
QUADRO A.16. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 5% .....	A.8
QUADRO A.17. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA CIMPOR + SÍLICA DE FUMO 10% .....	A.9
QUADRO A.18. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA CIMPOR + FILER CALCÁRIO 15% .....	A.9
QUADRO A.18. RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS (FLEXÃO E COMPRESSÃO) SEGUNDO A NORMA NP EN 196-1 NA AMOSTRA CIMPOR + FILER CALCÁRIO 30% .....	A.9



# 1. Introdução

---

## *1.1. Enquadramento Geral*

A utilização de adições versus cimento tem vindo a ser uma mais-valia na construção ao longo dos últimos anos, visto obterem-se melhores características nas pastas e betões aliando-se um aproveitamento de materiais residuais.

Esta substituição pode ter influência na retração autogénea.

Assim, o objecto deste trabalho é a verificação laboratorial de 4 tipos de adições e a sua influência no fenómeno da retração autogénea em pastas de cimento.

## *1.2. Objetivo*

Ao longo dos últimos 30 anos têm sido utilizados betões mais resistentes, o que implica relações A/C mais baixas, fazendo aumentar o fenómeno da retração autogénea. Por outro lado a utilização de adições permite diminuir a dosagem do cimento, aumentando assim a relação A/C.

O objetivo deste trabalho é assim, verificar a eficiência de 4 tipos de adições (cinzas volante, metacaulino, sílica de fumo e filer calcário) neste fenómeno, por comparação com misturas obtidas sem qualquer tipo de adição. Esta comparação foi feita usando 2 cimentos de referência, tendo-se também analisado a retracção associada ao uso isolado de cada um deles.

A dissertação é baseada em trabalho laboratorial e tem, como objetivo fundamental a avaliação da eficácia da utilização de certas adições no controlo da retração autogénea em pastas.

Desenvolveram-se 18 pastas, sendo 2 de referência com 2 tipos diferentes de cimentos nacionais e 16 de substituição de cimento por adições.

### ***1.3. Metodologia***

A metodologia para se alcançarem os objectivos, foi a avaliação da retracção autogénea de pastas, em que se substituiu parte do cimento em massa por diferentes percentagens de adições.

### ***1.4. Estrutura da dissertação***

Este trabalho encontra-se dividido em 8 capítulos principais, sendo apresentado seguidamente cada um dos mesmos.

O segundo capítulo é dedicado à teoria e enquadramento do tema desta dissertação, nomeadamente no que toca à retração química, retração autogénea e a sua relação e também no fim um breve resumo acerca do processo de hidratação do cimento.

O terceiro capítulo foca-se na descrição dos materiais utilizados e das suas características.

O quarto capítulo aborda os processos laboratoriais efectuados assim como mostra mediante figuras, os materiais utilizados.

No quinto capítulo apresentam-se os resultados individuais de cada pasta efectuada, nomeadamente no que toca à retracção autogénea, mediante 3 tipos de gráficos, procedendo-se após cada conjunto a uma breve interpretação dos mesmos.

A análise comparativa surge no sexto capítulo, onde são confrontadas diversas adições com os seus respectivos cimentos padrão e é feita a respetiva análise.

No sétimo capítulo é realizada uma análise comparativa entre a retração autogénea e a retração química.

No oitavo capítulo são apresentadas as conclusões.

Por fim no nono capítulo são discutidos os desenvolvimentos futuros que podem advir deste trabalho.

## 2. Tipos de Retração

---

A retração é um fenómeno físico-químico resultante da hidratação do cimento e da secagem do material cimentício que causa uma diminuição do seu volume com o tempo. Existem vários tipos de retração como por exemplo retração por secagem, retração por carbonatação, retração por variação de temperaturas, etc. Os diferentes tipos de retração podem dividir-se também em retração de curta idade (Early Age) e de idade avançada (long Term), que pode ser dividida respectivamente antes das 24 horas e depois das 24 horas. Na figura 1 está presente um diagrama que subdivide o tipo de retração por tempo de ocorrência. Neste estudo apenas se estudou a retração autogénea e a retração química em materiais cimentícios, assim como a sua relação.

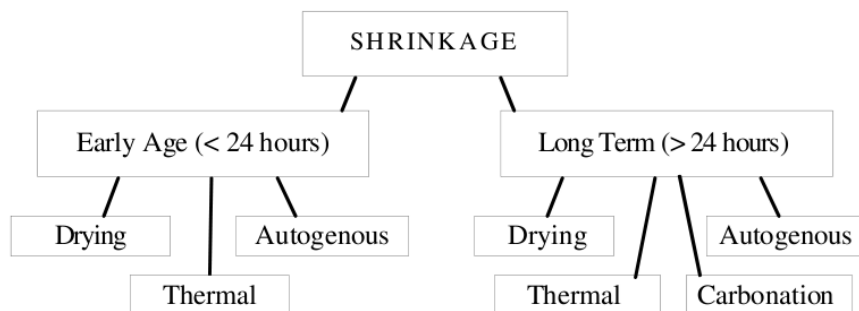


Fig. 1: Diagrama de tipos de retração e estágios de actuação [5].

### 2.1. Retração autogénea

Segundo E-I Tazawa [1] no prefácio dos trabalhos “Autoshrink 98”, foi C.G. Lyman quem em 1934 começou a usar a expressão “Retração Autogénea”, para descrever o fenómeno pelo qual o betão encolhe/retrai por si próprio, sem qualquer mudança de matéria ou temperatura. No entanto, a descoberta da retracção química que está na origem da retração autogénea, retoma a cerca de cem anos com o trabalho de Le Chatelier na hidratação do cimento.

Em 1940, H.E Davis [2] escreveu num artigo acerca da retração autogénea “No

entanto, não será normalmente prático ou desejável prestar atenção a diferenças entre os movimentos autogéneos, os quais se pensa serem relativamente pequenos e directamente relacionados com a secagem e a temperatura.”

No ano de 1980, o autor Italiano Collepardi [3] explica a situação da seguinte forma: “...retração autogénea, que na ordem de  $100\mu\text{m}/\text{m}$ , é significativamente menor que a (normal) retração por secagem, que pode alcançar  $1000\mu\text{m}/\text{m}$ . Em qualquer caso, aparte da importância negligenciável da retração autogénea se comparada com a retração por secagem, na prática a última incluirá a primeira.”

É importante referir que ao longo deste período relatado nos últimos parágrafos de aproximadamente 50 anos, que “os betões normalmente utilizados possuíam uma grande razão A/C, na ordem dos 0,60 a 1,0” [4].

No entanto, a partir dos anos 80 o mundo das composições clássicas de betão até ai utilizadas começou a modificar-se. Devido ao desenvolvimento de materiais de elevada performance, betões com relações água/cimento (A/C) e água/ligante (A/L) bastante reduzidas, ou seja, desenvolveram-se bastante os betões de elevada resistência, trazendo consigo não só vantagens mas também algumas desvantagens, como é o caso da fissuração devido ao fenómeno da retração autogénea. Assim, este fenómeno tornou-se quase tão importante como a retração por secagem neste tipo de misturas, começando assim o estudo deste fenómeno a nível global. Segundo a Sociedade Japonesa de Engenharia Civil: “Com o desenvolvimento do estudo do betão, os resultados das investigações à retração autogénea estão a acumular-se, apontando-a como uma das causas da fissuração no betão.”

Assim, pode-se definir hoje em dia, retração autogénea como sendo “ a redução macroscópica de volume de materiais cimentícios aquando da hidratação do cimento após configuração inicial. A retração autogénea não inclui variações de volume devido à perda ou ganho de substâncias, variação de temperatura ou aplicação de uma força ou constrangimento externo...” [1] e é causada “ pelo consumo de água devido ao processo de hidratação dos materiais cimentícios”, que por sua vez também variam conforme a sua composição e rácios de hidratação.

De acordo com Holt. Erika [5], “retração autogénea é uma variação de volume que ocorre sem transferências da mistura com a sua envolvente. Sendo apenas o resultado das reações químicas internas e das reações estruturais presentes na mistura

ao longo da sua maturação”.

A retração autogénea é devida às reações químicas internas quando ao espécime não é permitido transferir água com o meio envolvente. [5]

Este fenómeno está directamente ligado às diferentes fases de hidratação e secagem da pasta de cimento, sendo que a sua relação com outros processos e forma de surgir muda ao longo dos diferentes tempos de cura do material.

Um exemplo estudado do fenómeno retracção autogénea é o aeroporto internacional de Denver em que foi notificada fissuração após 7 dias da colocação do betão com as técnicas adequadas até então, mostrando-se assim visível um tipo de retração “invisível” até essa altura.

As fases da retração autogénea, ou seja, as fases em que o processo da retracção autogénea sofre diferentes influencias e pode ser delimitado por elas são as três apresentadas de seguida:

### **2.1.1: Estado Líquido da Pasta:**

Imediatamente após a mistura do cimento com a água, uma mudança devida à retração química que se mostra numa redução do volume dos reagentes para os produtos da reacção ocorre. E tal como presente na figura 2, a retração autogénea é equivalente à retração química.

### **2.1.2: Formação do esqueleto sólido:**

Nesta fase, dá-se a separação entre a relação entre retração química e retração autogénea e a última passa a estar ligada a retração por secagem da pasta. Neste ponto o esqueleto é formado com aumento da rigidez da pasta, passando a resistir às variações de volume devido à retração química, é nesta fase que a pressão da capilaridade têm início podendo causar alguma retração. Os mecanismos de pressão aqui presentes são descritos no ponto 2.4.

### 2.1.3: Fase sólida:

“A retração por secagem é a perda de água localizada resultante de um decréscimo da humidade relativa” [5], a baixa humidade relativa é devida às necessidades extra por parte do cimento para completar o processo de hidratação. Este processo decorre durante muito mais tempo do que a retração autogénea e não começa imediatamente, e é mais acentuado nos betões de alta resistência devido à fraca relação A/C. As investigações por Powers & Brownyard (1948) [7], mostram que a retração autogénea devido à secagem ocorre quando o rácio água/cimento é inferior a 0,42, devido ao consumo de toda a água presente. Já Taylor 1997 [8] mostra que este rácio depende do tipo de cimento e varia entre 0,36 e 0,48.

Na figura 2 (Acker 1988) [9] está esquematizada a evolução da retração autogénea em função do grau de hidratação.

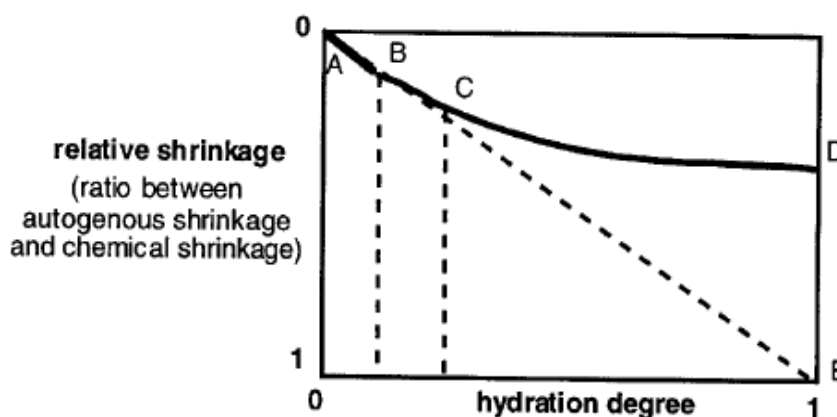


Fig. 2: Evolução da retração autogénea em função do grau de hidratação [Acker 1988].

Entre o ponto 0 e A, a retração química é igual à retração autogénea.

Entre o ponto A e B, a estrutura começa a possuir alguma rigidez.

Entre o ponto B e C dá-se a transição entre a fase fluida e a fase sólida.

Entre o ponto C e D encontra-se a retração no estado sólido.

Entre o Ponto 0 e E a recta corresponde à retração química.



As diferentes adições utilizadas apresentam comportamentos face ao fenómeno da retração autogénea variáveis. Seguidamente, é apresentada cada adição e o seu comportamento expectável com base na bibliografia estudada.

A sílica de fumo associada a um decréscimo da razão água/cimento faz aumentar a retração autogénea com o aumento da percentagem de substituição. Este aumento está relacionado com a maior dessecação das pastas na reacção do hidróxido de cálcio com a sílica de fumo e com o refinamento da estrutura porosa.

Já com o metacaulino e com as cinzas volantes, a retração autogénea tende a diminuir com o aumento da percentagem de substituição, que se relaciona com o efeito de “diluição”, que aumenta a razão A/C efectiva, mas o efeito é também dependente da velocidade de hidratação e da alteração da estrutura porosa, nomeadamente a dimensão dos poros e a rigidez, pelo que nem sempre se obtém vantagens na sua utilização.

Por fim, com o filer calcário, a retração autogénea tende a diminuir por efeito da “diluição”, mas sem contrapartida em produtos hidratados.

Todos estes efeitos previstos são baseados em estudos que mais tarde na interpretação de resultados serão mencionados à medida que as diferentes adições são estudadas e comparadas no capítulo 6 deste trabalho. Sendo que as condições de laboratório, as normas e os próprios meios utilizados para o estudo divergirem dos estudos referidos, é de esperar que nem sempre se atinjam resultados tal qual o esperado.

## 2.2. Retração química

“A retração química, é a redução dos volumes do total de líquidos e sólidos produzidos pela reação química de hidratação, pode ser assim considerado o mecanismo de condução da retração autogénea. Sendo assim, o estudo da retração química é muito importante na ajuda do estudo da retração autogénea. Especialmente porque permite-nos determinar a sua taxa inicial, o que é um parâmetro chave para problemas de fissuração em betões jovens.” [6]

Segundo Tazawa [1], “A retração química é o fenómeno no qual o volume absoluto de produtos hidratados, é menor que o volume total de cimento e água antes da hidratação”. Por outro lado segundo [6] “a retração química é uma redução no volume absoluto cujo efeito no volume aparente (retração autogénea) irá depender da porosidade e da rigidez do material”.

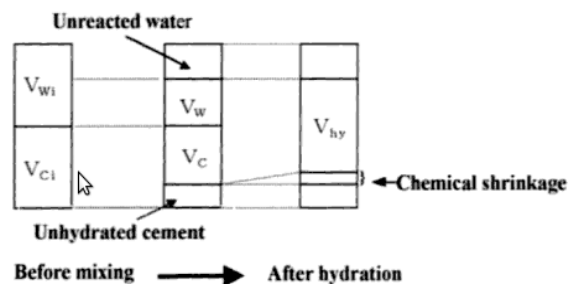


Fig. 3: Retração química em cimentos [Tazawa 1999].

Legenda:

$V_{wi}$ : Volume de água antes da amassadura;

$V_{ci}$ : Volume de cimento antes da amassadura;

$V_w$ : Volume de água que reagiu;

$V_c$ : Volume de cimento que reagiu;

$V_{hy}$ : Volume dos produtos hidratados.

### 2.3. Relação entre a retração química e retração autogénea

Tazawa no Internacional workshop “Autogenous Shrinkage of Concrete” [1] apresenta um gráfico da relação entre a retração química e a retração autogénea, gráfico este apresentado na figura 4:

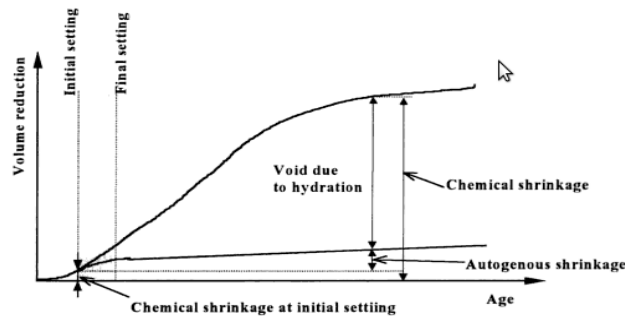


Fig. 4. Relação entre a retração química e a retração autogénea [Tazawa 1999].

Nesta figura a retração autogénea é considerada a redução de volume externo após a formação do esqueleto sólido.

A retração é no entanto devida ao movimento ou perda de água. À medida que a água se perde quer a evaporação (retração por secagem) quer por reações internas (retração autogénea), são geradas forças de tensão. Estas forças de tensão fazem com que o material cimentício se comprima, registando assim uma diminuição do volume da pasta. Este fenómeno é maior nos primeiros tempos de cura uma vez que o material ainda não possui grande resistência para fazer frente a este fenómeno, fazendo com que um esforço mais pequeno gere grandes retrações nestes estádios de cura.

## 2.4. Processos de hidratação do cimento

Sendo que esta dissertação se foca na retração autogénea é fundamental focar todo o processo de formação da pasta propriamente dita e as suas reacções de hidratação.

O progresso das reacções no cimento até chegar ao seu potencial máximo é chamado grau de hidratação. Na figura 5 [Kronl6f 1999] [10] da esquerda para a direita é esquematizada o avanço típico da hidratação do cimento, resultando num decréscimo da porosidade do mesmo.

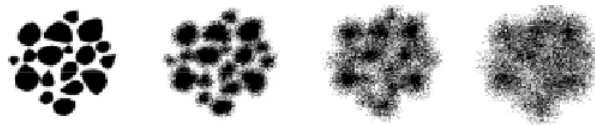


Fig 5: Evolução da hidratação no cimento [Kronl6f 1999].

Além do processo de hidratação inicial começa também a desenvolver-se um processo oposto ou seja um processo de secagem da pasta, que é ao fim ao cabo a perda de água por parte da mesma. Os mecanismos de secagem nas pastas que causam retração dependem directamente dos espaços porosos no interior das mesmas. Na fig. 6 [Mehta & Monteiro] [11], são descritos os vários tipos de estrutura porosa assim como as partículas sólidas presentes no cimento hidratado. Os vazios capilares são espaços que outrora foram ocupados pelo excesso de água que foi movida durante o processo de hidratação no cimento.

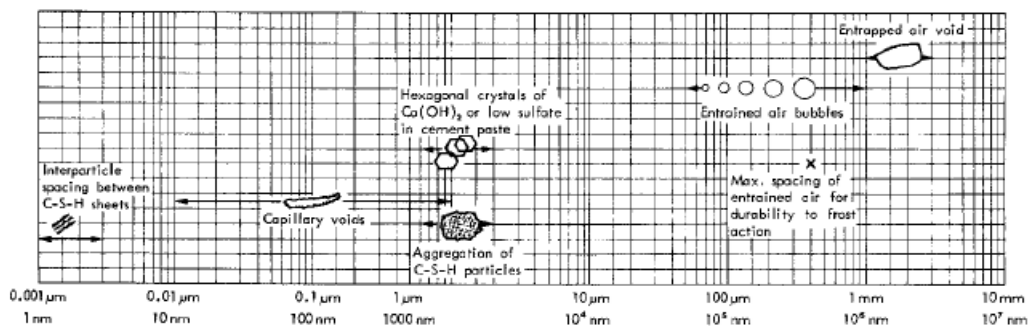


Fig. 6: Distribuição de corpos sólidos e poros na pasta de cimento hidratada [Mehta & Monteiro].

A introdução de adições no cimento tais como sílica de fumo ou microsilica refinam a estrutura porosa do cimento, subdividindo os poros maiores existentes, mantendo no entanto o volume total de poros na pasta.

Em 1968 Powers [12], estabeleceu a relação entre a estrutura porosa do cimento e a evaporação de água do mesmo. “As superfícies do líquido tornam-se numa infinidade de superfícies curvas (meniscos), que são côncavas entre as partículas. Assim, a pressão do fluido no lado convexo do menisco é inferior à parte côncava, isto é, menos que a pressão atmosférica, sendo que esta diferença constitui uma força que aliada à força da gravidade movimentam as partículas.” Este fenómeno está devidamente esquematizado na figura 7 [Radocea 1992] [13].

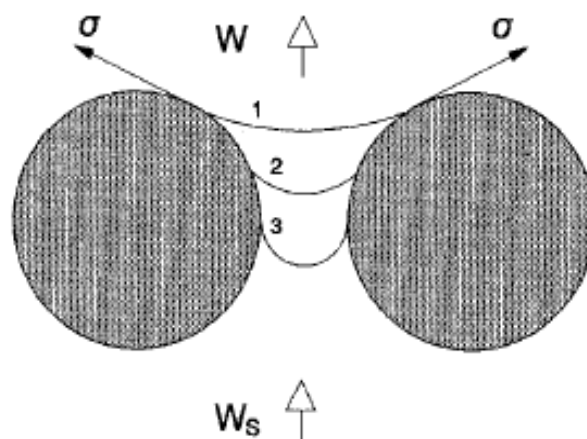


Fig. 7: Tensões que atraem o menisco da água entre 2 partículas, devido a transferência de massa e desenvolvimento da pressão capilar [Radocea 1992].

Por fim, a figura 8 [Tazawa 1999] esquematiza bem o papel total dos poros no cimento e a sua definição em termos de volume aparente e volume absoluto na pasta de cimento. Pode-se entender assim a ordem de grandeza de todo o processo analisado até agora.

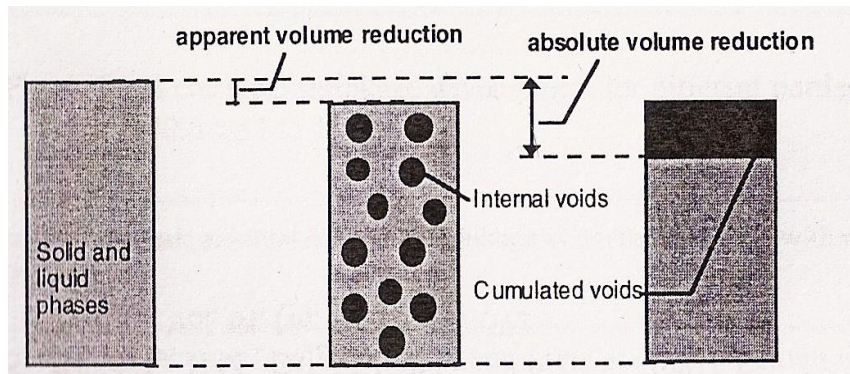


Fig. 8: Ilustração da definição de volume aparente e absoluto [Tazawa 1999].

## 3. Materiais Utilizados

---

Neste capítulo são apresentados todos os materiais utilizados durante a preparação das pastas.

### 3.1. Cimento

O cimento Portland é o ligante hidráulico mais importante de todos. Segundo A. de Sousa Coutinho [15], “ a designação ligante deve-se à propriedade que têm de poder aglomerar uma proporção elevada de materiais inertes, conferindo ao conjunto grande coesão e resistência”, a designação hidráulico segundo o mesmo autor deve-se ao facto de “ além de endurecerem ao ar, são capazes de adquirir elevadas resistências debaixo de água”.

O cimento Portland é obtido através de uma mistura de vários componentes tais como: Cálcio (carbonato de cálcio), argila (Silicatos de Alumínio e Ferro) e, eventualmente outras substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro. A mistura é bem homogeneizada e bem dispersa, quer a seco (fabricação por via seca) quer por meio de água (fabricação por via húmida).

Os cimentos utilizados no processo laboratorial foi o Secil I 42,5R e o Cimpor I 42,5 R, provenientes respectivamente da fabrica de Outão e da fabrica de Alhandra.

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica e tempo de presa dos cimentos ensaiados estão em tabelas anexas nos anexos 1 e 2. As características químicas são apresentadas nos seguintes quadros:

Ensaio Químico	Cimpor	Secil
Perda ao fogo (%)	1,97	2,74
SiO <sub>2</sub> (%)	19,26	20,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5,82	4,37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,27	3,46
CaO (%)	63,37	64,79
MgO (%)	1,82	0,99
SO <sub>3</sub> (%)	2,97	2,6
K <sub>2</sub> O (%)	1,15	0,42
CO <sub>2</sub> (%)*	1,51	1,51

Quadro 1: Características químicas dos cimentos utilizados

**Nota:** O CO<sub>2</sub>, foi calculado segundo a norma [28], tendo como base um conteúdo em filler calcário de 5%.

Composição Bogue	Cimpor	Secil
C3S (%)	51,526	62,213
C2S (%)	16,347	10,435
C3A (%)	9,890	5,726
C4AF (%)	9,951	10,529

Quadro 2: Características químicas dos cimentos utilizados: Composição Bogue

**Nota:** A norma utilizada para os cálculos da composição Bogue é a norma [28]

Secil	Composição Bogue	Método Rietveld
C3S (%)	62,21	56,80
C2S (%)	10,43	19,50
C3A (%)	5,73	2,90
C4AF (%)	10,53	10,10

Quadro 3: Características químicas dos cimentos utilizados: Comparação entre o método Rietveld e composição Bogue do cimento Secil.



### **3.2. Areia**

A areia foi o tipo de agregado utilizado no processo laboratorial. Segundo A.Sousa.Coutinho [15], “os inertes podem ser classificados de diferentes maneiras conforme o ponto de vista considerado”. Assim, as areias são classificadas segundo o ponto de vista das dimensões do agregado, como o agregado com dimensões inferiores a 5mm. As areias podem ainda ser roladas quando são naturais de origem sedimentar ou britadas quando são obtidas por fractura artificial. A areia utilizada foi uma areia natural rolada e lavada.

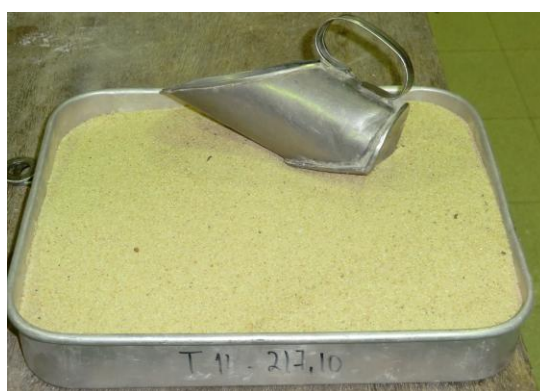


Fig. 9: Areia utilizada em laboratório.

### **3.3. Adjuvante- Glenium 26 SCC - Super plastificante.**

A finalidade nos adjuvantes nos betões e pastas é melhorar o seu desempenho face a determinado factor. Neste trabalho usou-se um polímero superplastificante à base de cadeias de éter carboxilo, o glenium 26 SCC, comercializado pela marca BASF. Este tipo de material é utilizado de forma a compensar a baixa razão A/C presente nas pastas deste trabalho (0,3), melhorando a sua trabalhabilidade. Possui uma forma líquida. A dosagem recomendada deste material é de 1% a 1,6% da dosagem do cimento, sendo que no trabalho laboratorial usou-se 33g num conjunto de amassadura total de 2200g, o que corresponde a uma percentagem total de 1,5% do cimento.



Fig. 10 e 11: Glenium 26 SCC, aspecto do recipiente e aspecto do material.

As características apresentadas pela BASF no seu manual técnico deste adjuvante são apresentadas na seguinte tabela:

<b>Características técnicas</b>	
Aspecto:	Líquido castanho
Densidade relativa (20°C)	1,03-1,07 g/ml

Quadro 4: Dados técnicos Glenium 26 SCC

### **3.4. Água.**

Foi utilizada água destilada à temperatura ambiente durante todo o processo experimental.

### **3.5. Adições.**

No Século XX tem-se verificado um aumento substancial na utilização de adições por parte das indústrias do cimento e do betão, estimando-se que a taxa de consumo continua a aumentar devido, sobretudo ao desenvolvimento de

superplastificantes e superpozolanas tais como: Sílica de Fumo, cinzas de casca de arroz, matacaulino, cinzas volantes de elevada finura e escórias de alto-forno de elevada finura. [16]

### 3.5.1. Cinzas Volantes.

As cinzas volantes são um subproduto obtido da geração de energia eléctrica, resultando da queima de carvão pulverizado ou moído, que é arrastado nos gases da combustão.

Visto possuírem características pozolânicas são utilizadas pela indústria da construção, o que é uma vantagem para ambas as partes visto que alivia também a indústria eléctrica destes resíduos.

Segundo A. Sousa Coutinho [15] “a composição química das cinzas volantes é condicionada fundamentalmente pelo tipo de carvão utilizado, embora as condições de combustão sejam também importantes, nomeadamente no que refere à quantidade de carvão por queimar existente nas cinzas”

As cinzas volantes são usadas na indústria da construção como substitutos do cimento ou como correcção da granulometria do inerte, ou ambas, sendo que a primeira é a mais frequentemente utilizada.

As cinzas volantes utilizadas são originadas da Central do Pego e as suas características encontram-se presentes nas seguinte tabelas:

<b>Determinações</b>	<b>Resultados</b>	<b>Documentos normativos</b>
Perda ao Fogo (%)	2,9	NP EN 196-2 (seção 7): 2006

Quadro 5: Ensaio químicos das cinzas volantes

As características químicas das cinzas volantes ensaiadas em laboratório pelo fabricante das mesmas, estão resumidas em forma de tabela, no entanto representam uma média de várias datas existentes.

Parâmetro	Norma do ensaio	Valor médio	Periodicidade mínima
Perda ao rubro (%)	NP EN 196-2 (seção 7): 2006	4,65	Diária
Determinação da finura 0,045 mm (%)	NP EN 451-2: 1995	13,53	Diária
Deter. Do Óxido de cálcio livre (%)	NP EN 451-1: 2006	0,84	Semanal
Det. De cloretos (%)	NP EN 196-2 (seção 14): 2006	<0,01	Mensal
Det. De sulfatos (%)	NP EN 196-2 (seção 8): 2006	0,53	Mensal
Det. Do óxido de cálcio (%)	NP EN 196-2 (seção 13.14): 2006	6,07	Mensal
Índice de actividade aos 28 dias (%)	NP EN 196-1:2006	81	Quinzenal
Índice de actividade aos 90 dias (%)	NP EN 196-1:2006	101	Quinzenal
Expansibilidade (mm)	NP EN 196-3:2006	1,1	Quinzenal
Massa volúmica (g/cm <sup>3</sup> )	NP EN 196-6:1990	2,33	Quinzenal

Quadro 6: Ensaio químicos das cinzas volantes fornecidos pelo fabricante

### 3.5.2. Metacaulino.

O metacaulino é obtido por tratamento térmico e eventual moagem do caulino , cuja activação pozolânica pelo hidróxido de cálcio fornece produtos de composição e estrutura similares aos produzidos com o cimento portland.

“Metacaulino é basicamente composto de Sílica e Alumina num estado amorfo que reage com o hidróxido de cálcio (CH) produzido pela hidratação do cimento Portland, para formar hidrato de cálcio (C-S-H) e hidrato de silicato hidratado (essencialmente gelatina C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>).” [17]

“Ao contrário de outras misturas minerais, que são basicamente derivadas de pozolanas, com composição variável, pureza e reactividade, a produção de metacaulino pode ser estritamente controlada, obtendo assim uma maior pureza e reactividade da pozolana.” [18]

As características químicas do metacaulino, cedido pela marca IMERYS, foram ensaiadas em laboratório e estão presentes no seguinte quadro:

Determinações	Resultados	Documentos normativos
Óxido de Magnésio, MgO (%)	<0,2	NP EN 192-2 (SECÇÃO 13.15): 2006
Óxido de Silício, SiO <sub>2</sub> (%)	55,09	NP EN 192-2 (SECÇÃO 13.4): 2006
Óxido de Ferro, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1,67	NP EN 192-2 (SECÇÃO 13.10): 2006
Óxido de Alumínio, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	38,52	NP EN 192-2 (SECÇÃO 13.11): 2006
Óxido de sódio, Na <sub>2</sub> O (%)	0,05	Método interno
Óxido de Potássio, K <sub>2</sub> O (%)	0,44	Método interno

Quadro 7: Ensaio químicos do metacaulino

### 3.5.3. Sílica de Fumo.

A sílica de fumo é um subproduto da preparação do silício ou de ligas de silício, especialmente de ferro-silício, em fornos eléctricos de arco, onde o quartzo é reduzido pelo carvão, a elevadas temperaturas. [15]

Esta adição tal como as cinzas volantes, ao ser um resíduo resultante da indústria da energia, alia a vantagem de ao ser utilizada no sector da construção ajuda na reciclagem deste produto que de outra forma seria um produto excedente sem fins aparentes.

As características químicas da sílica de fumo ensaiadas em laboratório estão presentes no seguinte quadro, a sílica utilizada é BASF MEYCO MS610:

Determinações	Resultados	Documentos normativos
Óxido de Silício, SiO <sub>2</sub> (%)	65,73	NP EN 192-2 (SECÇÃO 13.4): 2006

Quadro 8: Ensaio químicos da sílica de fumo

### 3.5.4. Filer Calcário.

O filer é um material finamente moído com finura maior que o cimento Portland, com propriedade que melhoram o desempenho das pastas. Os fileres podem melhorar a hidratação do cimento Portland na medida em que funcionam como centros nucleares das reacções e, devidamente misturado no cimento, o filer calcário pode ser usado para reduzir a dosagem de água devido a melhoria da granulometria do

total das partículas a incorporar na pasta. Podem ser inertes não apresentando propriedades pozolânicas ou hidráulicas.

As características químicas da sílica de fumo ensaiadas em laboratório estão presentes no seguinte quadro, o filer utilizado é o R70 do grupo ParaPedra:

<b>Determinações</b>	<b>Resultados</b>	<b>Documentos normativos</b>
Óxido de cálcio (%)	55,92	MI 106: 2000

Quadro 9: Ensaio químicos do filer calcário

## 4. Procedimento Experimental

---

O trabalho experimental foi realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, durante o estágio efectuado na instituição, contando com a colaboração e apoio dos técnicos do Núcleo de Betões do Departamento de Materiais.

No trabalho experimental foram formuladas 18 pastas diferentes, sendo 2 pastas de referência (I42,5R Secil e I 42,5R Cimpor) e 16 pastas com adições a diferentes percentagens combinadas com ambos os tipos de cimento utilizados. As adições utilizadas foram: Cinzas volantes (15 e 30%), Filer calcário (15 e 30%), Sílica de Fumo (5 e 10%) e Metacaulino (10 e 20%).

### *4.1. Preparação das pastas*

Neste subcapítulo, é descrita a preparação das pastas. A norma seguida na preparação de todas as pastas foi a EN NP 196-1 [24], que diz respeito a uma mistura automática.

O laboratório onde foram realizados todos os ensaios e pastas tem uma temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e uma humidade relativa não inferior a 50%.

Utilizou-se um misturador com capacidade total de 4 litros (Figura 12), cujo recipiente é de aço inoxidável (Figura 13) e equipado de forma a estar fixo durante o decorrer do processo de amassadura, de maneira a que a pá misturadora e o recipiente possam ser ajustados e mantidos com precisão. A pá misturadora (Figura 14), é accionada e movimentada por um motor eléctrico, com velocidade regulada conforme a norma e com movimentos de rotação sobre si própria, acompanhado de um movimento planetário em torno do eixo do recipiente. Nas figuras seguinte é possível observar o equipamento utilizado e descrito, nomeadamente o misturador, o recipiente e a pá misturadora.



Fig. 12. Misturador



Fig. 13. Recipiente do misturador



Fig.14. Pá misturadora

No recipiente é introduzida água nas quantidades previamente determinadas (tendo como precaução reservar uma pequena parte da mesma para colocar imediatamente após a colocação do Glennium, ajudando a lavar o copo do mesmo). O recipiente é colocado na misturadora e inicia-se o processo automático. Começa-se por colocar o cimento manualmente (e adições no caso de as ter) nas quantidades previamente calculadas, de seguida e depois de todo o ligante depositado, coloca-se o



Glennium e a restante água resultante da lavagem do copo, esperando-se então pela paragem da amassadura, retirando-se o recipiente, fazendo a homogeneização manual da amassadura (com o auxílio de uma colher de pedreiro as paredes e o fundo do recipiente são raspados de a forma a misturar os constituintes acumulados). Por fim, volta-se a colocar o recipiente para que se termine o processo automático de amassadura.

No quadro seguinte são apresentadas as massas calculadas para todas as dosagens constituintes das pastas feitas ao longo do trabalho laboratorial. A quantidade calculada foi a necessária para se ter material para todos os ensaios a realizar.

Argamassa	Cimento (g)	Água (g)	Glennium 26 SCC(g)	Cinzas Volantes (g)	Sílica de Fumo (g)	Filer Calcário (g)	Metacaulino (g)	a/c	a/l
Secil I42,5 R	2200	660	33	0	0	0	0	0,3	0,3
Cimpor I42,5 R	2200	660	33	0	0	0	0	0,3	0,3
Se C.V. 30%	1540	660	33	660	0	0	0	0,428571429	0,3
Se C.V. 15%	1870	660	33	330	0	0	0	0,352941176	0,3
Cim C.V 30%	1540	660	33	660	0	0	0	0,428571429	0,3
Cim C.V 15%	1870	660	33	330	0	0	0	0,352941176	0,3
Se S.F.10%	1980	660	33	0	220	0	0	0,333333333	0,3
Se S.F.5%	2090	660	33	0	110	0	0	0,315789474	0,3
Cim S.F. 10%	1980	660	33	0	220	0	0	0,333333333	0,3
Cim S.F. 5%	2090	660	33	0	110	0	0	0,315789474	0,3
Se F.C. 30%	1540	660	33	0	0	660	0	0,428571429	0,3
Se F.C. 15%	1870	660	33	0	0	330	0	0,352941176	0,3
Cim F.C. 30%	1540	660	33	0	0	660	0	0,428571429	0,3
Cim F.C. 15%	1870	660	33	0	0	330	0	0,352941176	0,3
Se Me 20%	1760	660	33	0	0	0	440	0,375	0,3
Se Me 10%	1980	660	33	0	0	0	220	0,333333333	0,3
Cim Me 20%	1760	660	33	0	0	0	440	0,375	0,3
Cim Me 10%	1980	660	33	0	0	0	220	0,333333333	0,3

Quadro 10: Dosagens das pastas preparadas

**Nota:** De salientar que a razão A/L se mantém sempre inalterado.

## 4.2. Ensaios no estado fresco

### 4.2.1. Determinação da Retração Autogénea

O ensaio de determinação da Retração Autogénea foi realizado de acordo com o método descrito na especificação LNEC E 476-2007 [25].

O ensaio é auxiliado por:

1. Uma mesa vibratória para vibração dos provetes cilíndricos durante a moldagem (Fig. 15);
2. Tubos de polietileno de baixa densidade (Pe), com parede de espessura de aproximadamente  $0,05\pm 0,2$  mm, ondulados com diâmetros máximos de respectivamente  $29\pm 0,5$  mm e  $22\pm 0,5$  mm e comprimento de  $410\pm 10$  mm (Fig. 16);
3. Tampas para molde (2 por molde), com base menor e maior de respectivamente 22mm e 21mm e de  $19\pm 0,5$  mm de comprimento, providas de uma saliência no centro da base menor de forma a poder contactar com o material (Fig. 17)
4. Suporte para moldagem dos provetes na vertical, constituído por um tubo de plástico de diâmetro interno de 32mm (Fig. 17);
5. Dilatómetro munido de um Defletómetro digital graduado em milésima de milímetro, devendo possuir um alcance de pelo menos 13mm (Fig. 18);
6. Barra Padrão de aço (Fig. 19);
7. Recipiente para conservação dos provetes (Fig.20);
8. Resina Epoxy para fixação das tampas (Fig. 21);
9. Software DEFLEC de leitura e armazenamento de dados;
10. Funil para auxílio no enchimento dos provetes (Fig. 22);
11. Ventoinha (fig. 23)



Fig. 15: Mesa Vibratória



Fig. 16: Tubos de polietileno de baixa densidade

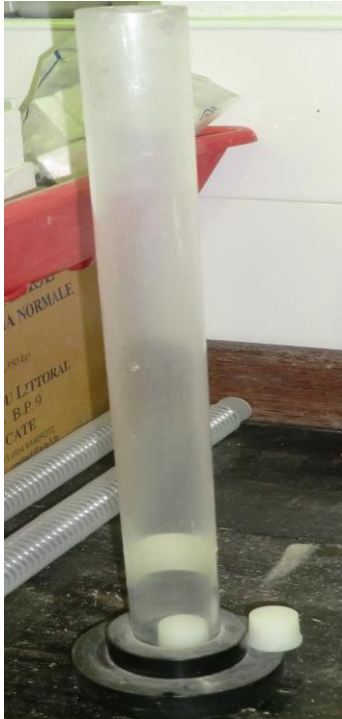


Fig. 17: Tampa e suporte para moldagem



Fig. 18: Suporte com dilatômetro e defletômetro

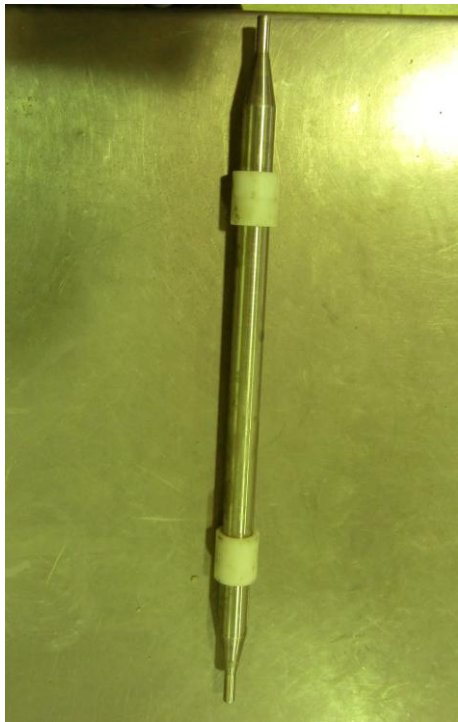


Fig. 19: Barra Padrão de aço



Fig. 20: Recipiente para conservação dos provetes



Fig. 21. Resina Epoxy



Fig. 22. Funil



Fig. 23. Ventoinha

Este é cronologicamente o segundo ensaio realizado após a amassadura, precedido apenas pela colocação do provete para realização do ensaio do tempo de presa. A pasta depois de homogeneizada e colocada nos 2 provetes enquanto estes se encontram acoplados à mesa vibratória. Para este processo utiliza-se um funil de forma a ser mais prática a colocação da pasta nos provetes. Após selados com o auxílio do suporte para a moldagem, os provetes são colocados no dilatómetro e é verificada o seu enquadramento na escala possível. Finalmente são tarados e inicia-se a leitura automática dos dados. É importante nesta fase ter uma série de precauções tais como: identificação dos provetes, preenchimento correcto das tabelas e ligar a ventoinha. A ventoinha trabalha durante os 2 dias seguintes ininterruptamente. É anotado também o valor aquando do início do ensaio da retração química. Por fim, após uma semana faz-se a ultima leitura automática e inicia-se a leitura manualmente, este processo decorre semanalmente durante um mês após a retirada dos provetes da leitura automática.



#### 4.2.2. Ensaio de determinação do tempo de presa.

Este ensaio foi realizado segundo a norma NP EN 196-3 [26] e o laboratório onde foram realizados todos os ensaios e pastas tem uma temperatura de  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  e uma humidade relativa não inferior a 50%.

Este é o primeiro ensaio a ser realizado após a amassadura.

Os materiais a utilizar são os seguintes:

- 1: Molde de Vicat (Fig. 24);
- 2: Pressómetro automático (Fig. 25)

Após a amassadura, enche-se o molde de Vicat e coloca-se no aparelho de determinação automática (Pressómetro automático) do tempo de presa e define-se o tempo inicial de leitura, após o qual num intervalo regular de 5 minutos será feita uma perfuração na pasta afim da determinação do tempo de presa.



Fig. 24: Molde de Vicat



Fig. 25: Pressómetro automático

### 4.2.3. Ensaio de determinação da retração química.

No caso do ensaio da retracção química, as condições de laboratório foram idênticas às processadas nos outros ensaios com a pasta em estado fresco. A norma seguida foi a [27]

Para a realização deste ensaio foram utilizados os seguintes materiais:

1. Frascos (Fig. 26)
2. Pipetas com tubo (Fig. 27)
3. Seringa (Fig. 28)
4. Balança (Fig. 29)
5. Rolha com tubo graduado (Fig. 30)
6. Parafina líquida (Fig. 31)
7. Molde de colocação do conjunto (Fig. 32)



Fig. 26. Frascos



Fig. 27. Pipeta com tubo



Fig. 28: Seringa

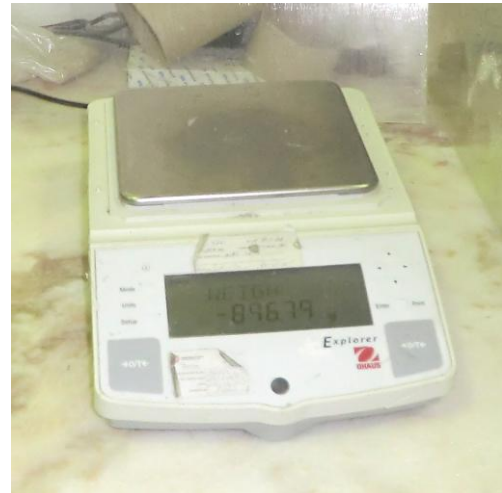


Fig. 29: Balança

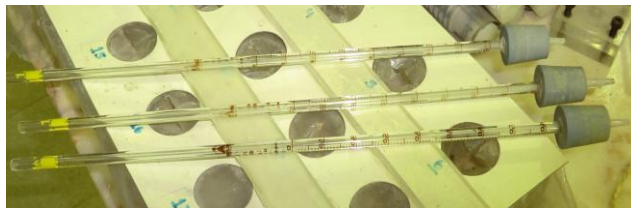


Fig. 30. Rolha com tubo graduado



Fig. 31. Parafina Liquida

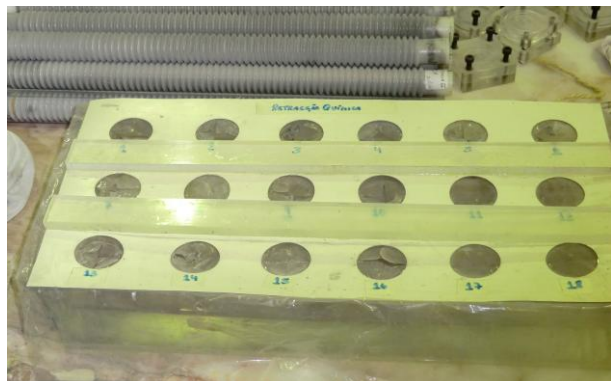


Fig. 32. Molde para colocação do conjunto



Em primeiro lugar, antes de se fazer a amassadura taram-se e identificam-se os 3 copos do ensaio. Após a amassadura, é retirado uma porção de material e colocado na seringa, que servirá para ajudar a introduzir o material nos tubos de ensaio. Após esta colocação o conjunto é novamente pesado. Adiciona-se água até encher os tubos e volta-se a tarar o conjunto. Por fim coloca-se a rolha com o tubo graduado e ajusta-se o menisco com ajuda do conjunto pipeta+ tubo à escala existente, e coloca-se uma gota de parafina no cimo do tubo de forma a isolar o ambiente. A figura 33 mostra a montagem no final do processo.

As leituras são feitas manualmente durante a primeira hora de 15 em 15 minutos e seguidamente de hora a hora até fecho do laboratório. Após 24 horas volta-se a fazer uma medição.

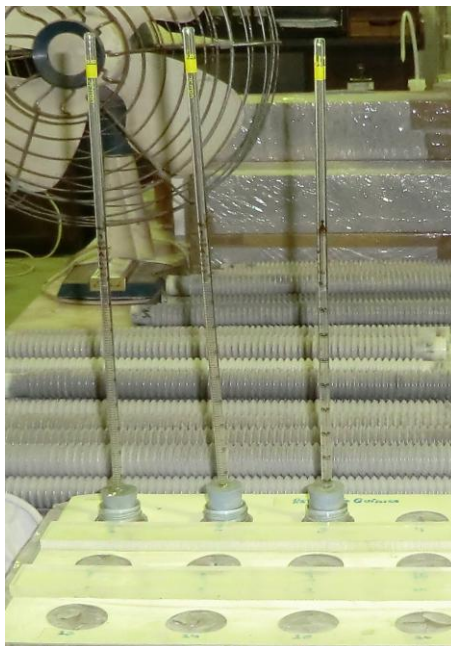


Fig. 33 Conjunto do ensaio

### 4.3. Ensaio em estado endurecido

#### 4.3.1. Ensaio de resistência à compressão e à flexão

Este ensaio laboratorial foi realizado conforme a norma NP EN 196-1:2006 [24]. O aparelho utilizado para a determinação desta propriedade é o apresentado nas figuras 34 e 35.



Fig. 34. Máquina ensaio à resistência à flexão e compressão



Fig. 35. Início ensaio à flexão

Para a realização dos ensaios foram utilizados 3 provetes, que são ensaiados respectivamente aos 7 e 28 dias de idade. Os provetes são compostos pela pasta usada nos ensaios em estado fresco previamente misturada com areia num processo igual ao da amassadura inicial. Após este processo são colocadas nuns moldes (Fig. 36) e ajustados com a ajuda de uma régua (Fig. 37), tapados com um vidro (Fig. 38) e colocados num armário isolado (Fig. 39). Após 24 horas são desmoldados e ficam a aguardar a idade certa para ensaio.



Fig. 36: Molde para provetes



Fig. 37: Régua de regularização

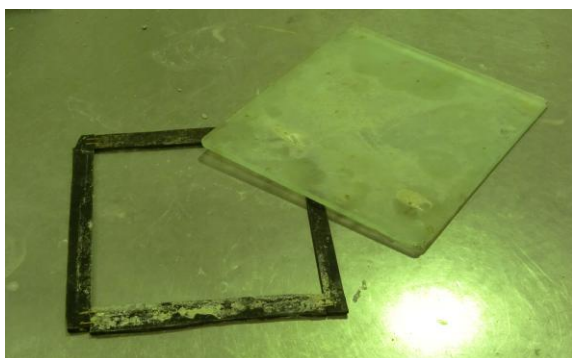


Fig. 38: Vidro



Fig. 39: Armário

Segundo a norma, o ensaio propriamente dito consiste em colocar o provete com uma face lateral de moldagem sobre os cilindros de apoio e o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios, e aplicar uma carga vertical sobre a face oposta do prisma, aumentando de forma uniforme à velocidade de  $50 \pm 10$  (N/s) até se dar a rotura do provete. Os prismas resultantes após a rotura são então envolvidos num pano húmido até serem ensaiados à compressão.

A resistência à flexão, em MPa é calculada pela fórmula:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

Onde:

$R_f$  – resistência à flexão, em MPa;

$b$  – lado da secção quadrada do prisma, em mm;

$F_f$  – carga aplicada no centro do prisma na rotura, em N;

$l$  – distância entre os apoios, em mm.

Segundo a norma, para a realização do ensaio de resistência à compressão, deve-se centrar lateralmente o semi-prisma em relação aos pratos da máquina a mais ou menos 0,5 mm e longitudinalmente de modo que a base do prisma fique saliente sem relação aos pratos ou às placas auxiliares em cerca de 10mm. Depois deve-se aumentar a carga gradualmente à velocidade de  $2400 \pm 200$  (N/s) até à rotura. O equipamento encontra-se presente na figura 40.



Fig. 40. Aparelho do ensaio da resistência à compressão

A resistência à compressão, em MPa é calculada pela fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Sendo:

R<sub>c</sub> – resistência à compressão, em MPa;

F<sub>c</sub> – carga máxima na rotura, em N;

1600 – Área dos pratos (40 x 40 [mm]), em mm<sup>2</sup>.

Os resultados obtidos quer num quer noutra ensaio serão apresentados em anexo.



## 5. Resultados da retração autogénea

---

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no ensaio da retracção autogénea ao longo de todo o período de leituras.

A leitura é automática durante a primeira semana, após a qual passa a haver leituras manuais durante 1 mês semanalmente, e por fim findo esse mês a leitura só volta a ser feita 1 mês depois da última das séries semanais.

São apresentados 3 tipos de gráficos para cada amostra: gráfico de extensão absoluta, gráfico fim de presa e gráfico de extensão da tangente nula. Em cada gráfico são representados os 2 provetes analisados em cada tipo de pasta.

Quer o gráfico de extensão absoluta quer de extensão tangente nula encontram-se num formato de logaritmo de tempo para melhor compreender os resultados obtidos.

Os gráficos de extensão absoluta representam a evolução do processo de retracção autogénea ao longo do tempo sem qualquer tipo de filtro, já os gráficos de extensão de fim de presa estão reiniciados à hora em que se deu o fim de presa de maneira a entender o comportamento da pasta após se dar o fim da presa. Por fim os gráficos de extensão de tangente nula estão reiniciados tal como o nome indica aos pontos em que a tangente das curvas apresentadas se anula, pressupondo que será esse instante em que se inicia o processo de retração na fase sólida.

**Nota:** A nomenclatura 1 e 2, 3 e 4 dizem respeito às bases onde foram colocados os provetes analisados, uma vez que apenas se podiam analisar 4 de cada vez. Todas as pastas possuem uma adição de 33g de super plastificante Glennium 26 SCC.

### 5.1. Pasta referência Secil Padrão

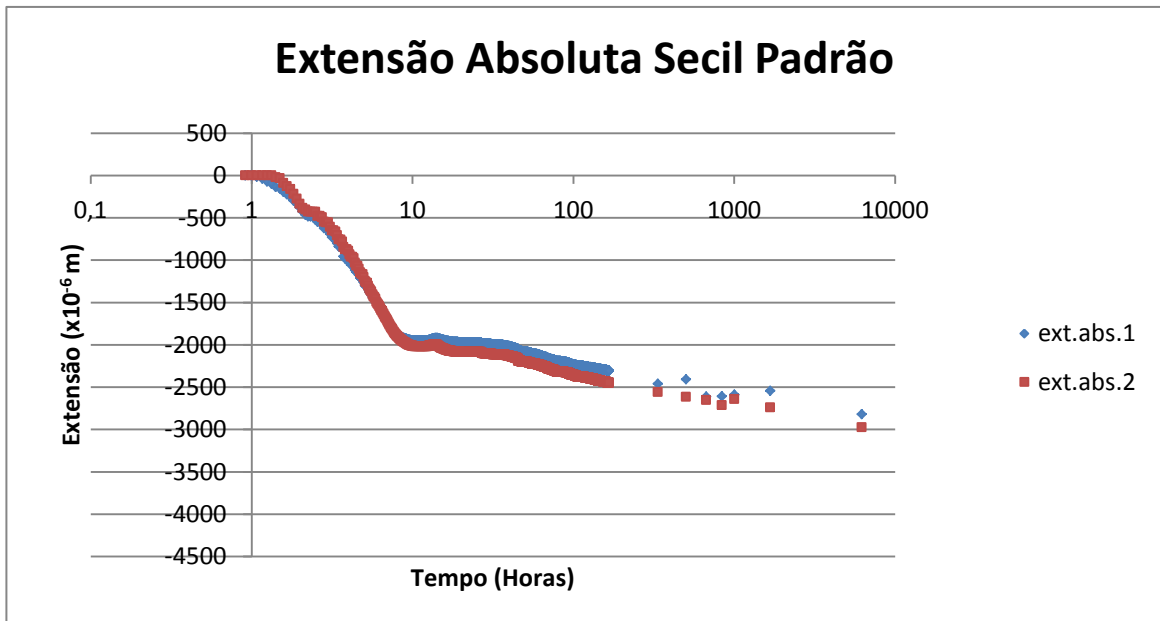


Gráfico 1: Extensão Absoluta Secil Padrão

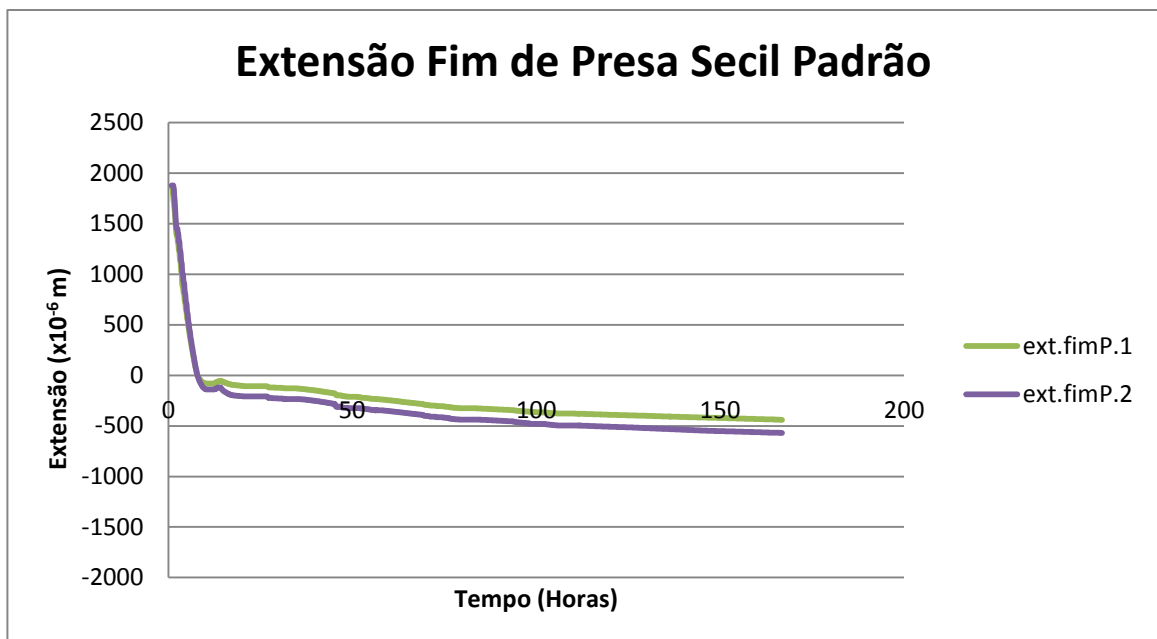
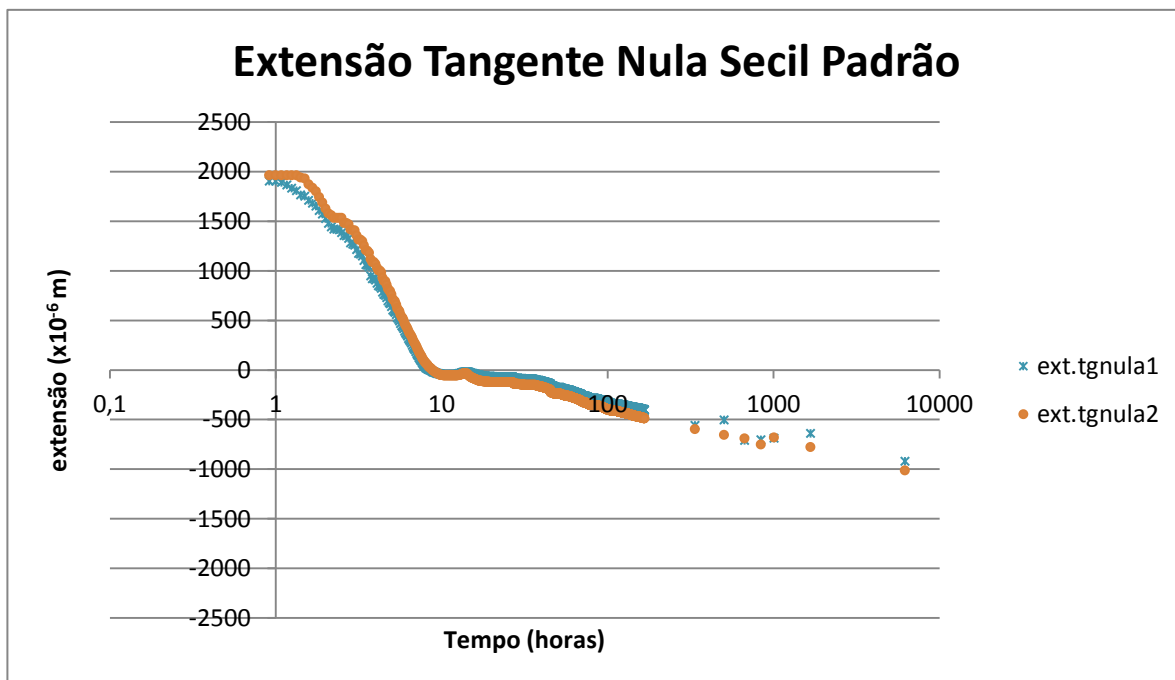


Gráfico 2: Extensão Fim de Presa Secil Padrão (leituras automáticas)





*Gráfico 3: Extensão Tangente Nula Secil Padrão*

A pasta de referência apenas com o cimento base, sem qualquer tipo de adição, tem as dosagens já apresentadas no Quadro 1 desta dissertação.

É visível no gráfico 1 que o maior incremento na retração autogénea se desenvolve ao longo das primeiras 10 horas de ensaio, que por sua vez representa aproximadamente o tempo até ao fim de presa que ocorre ao minuto 530, sensivelmente perto das 9 horas de ensaio na fase sólida.

No gráfico 2 é possível observar-se o andamento paralelo das 2 curvas representantes dos 2 provetes ensaiados, o que reflecte um comportamento semelhante por parte dos mesmos ao longo do período de ensaio.

Por fim no gráfico 3 é possível ter uma melhor noção da evolução da retração, havendo uma ligeira contracção do provete 1 e 2 nas últimas leituras.

A dispersão das últimas leituras deve-se a erros associados ao processo manual de medição.

## 5.2. Pasta Secil + Cinzas Volantes 15%

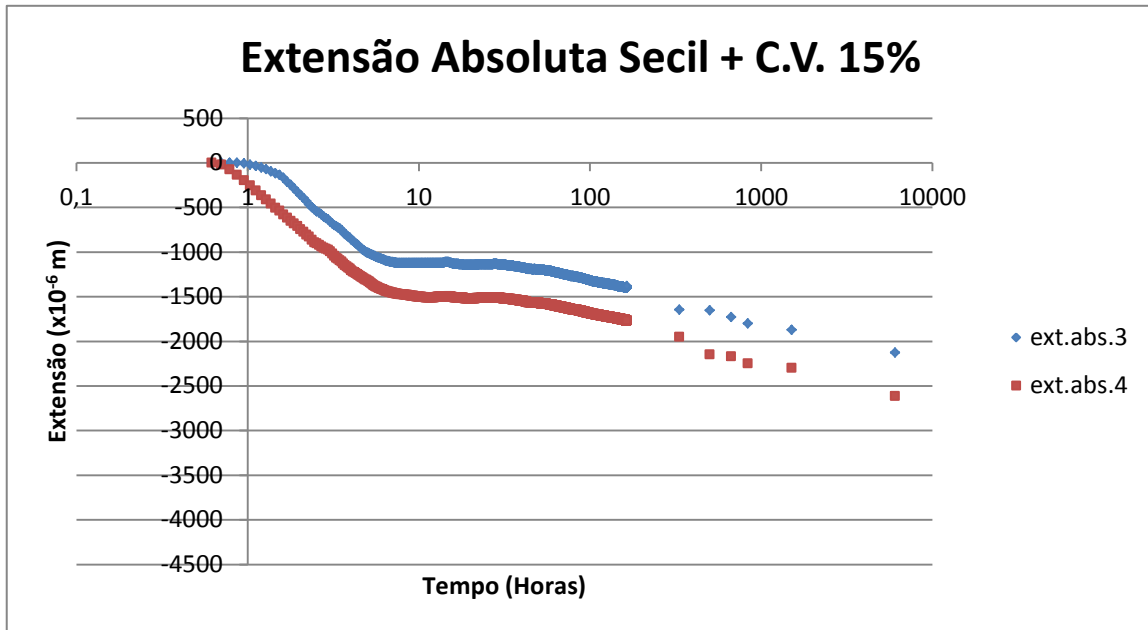


Gráfico 4: Extensão Absoluta Secil + Cinzas Volantes 15%

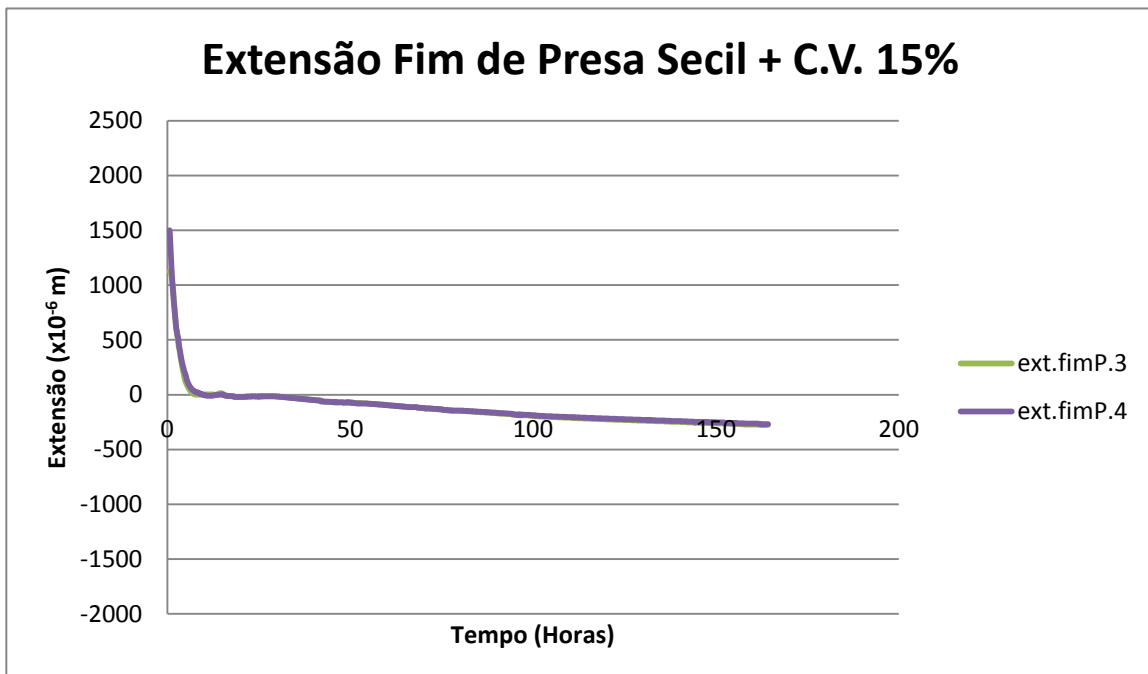
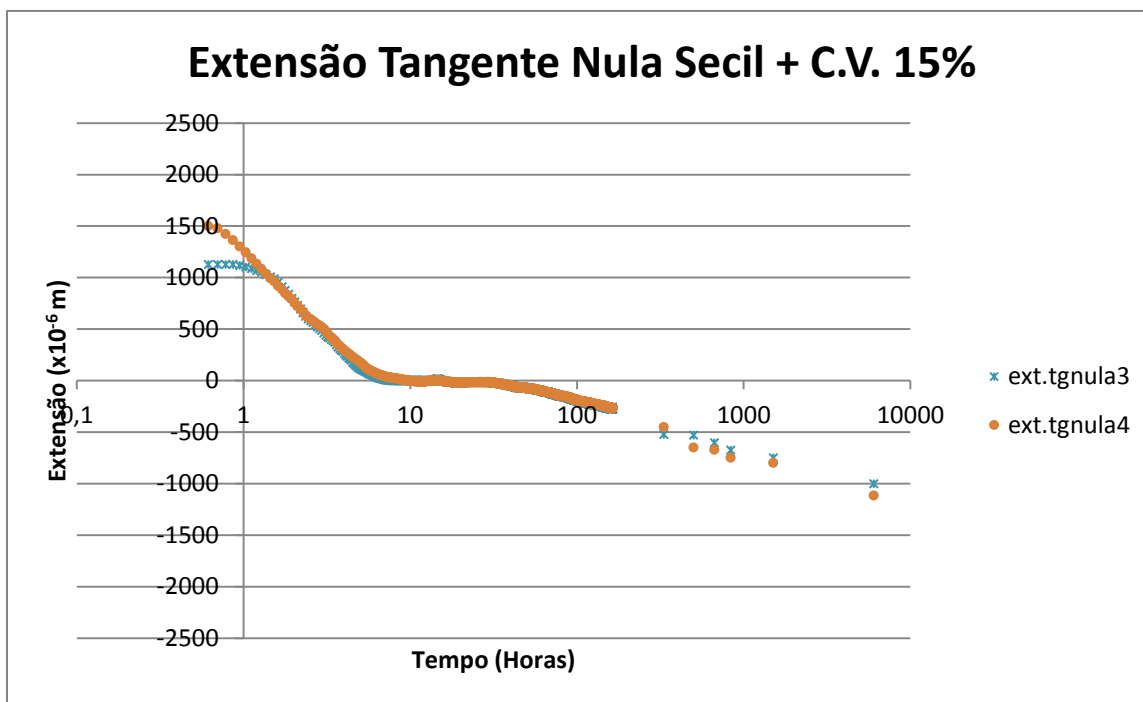


Gráfico 5: Extensão Fim de Presa Secil + Cinzas Volantes 15% (leituras automáticas)



*Gráfico 6: Extensão Tangente Nula Secil + Cinzas Volantes 15%*

Esta pasta contém uma substituição de 15% do cimento por cinzas volantes, representando 330 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

Ao longo das primeiras horas dá-se um acréscimo significativo da retracção autogénea, terminando esta escalada um pouco antes do fim da presa que se dá ao minuto 628.

O comportamento dos 2 provetes após o fim de presa são idênticos como pode ser testemunhado pela sobreposição dos gráficos ao longo do tempo.

Por fim no gráfico 6 é possível observar-se a evolução da extensão após a tangente nula, onde se confirma a aproximação de valores dos 2 provetes, sendo que existe uma pequena flutuação no final, associada à medição manual.

### 5.3. Pasta Secil + Cinzas Volantes 30%

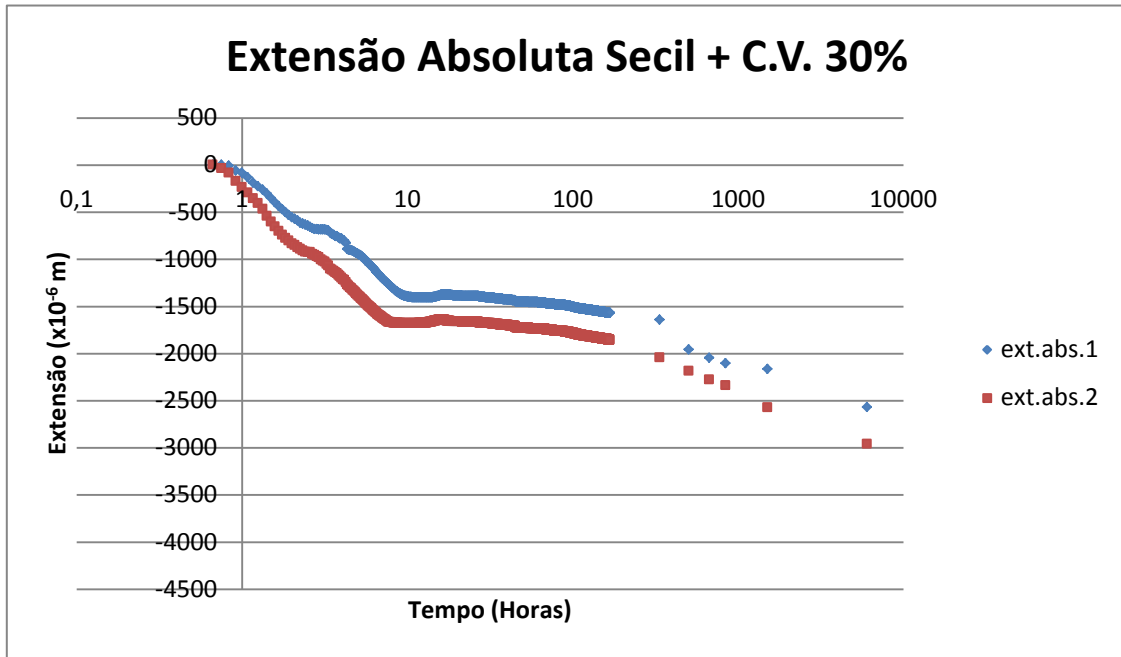


Gráfico 7: Extensão Absoluta Secil + Cinzas Volantes 30%

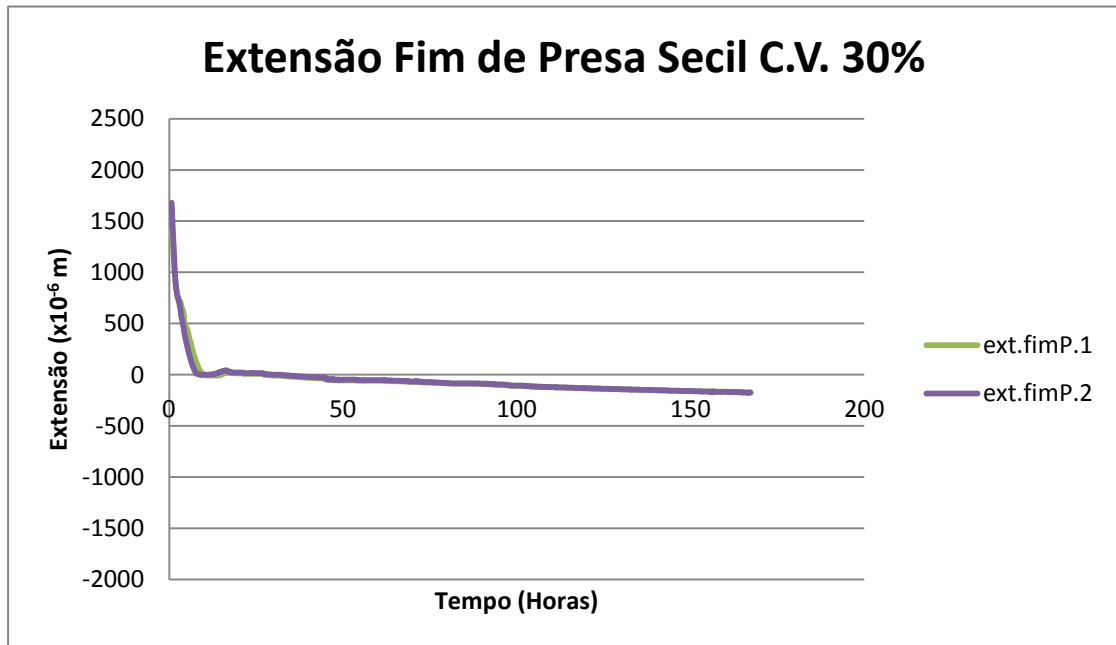
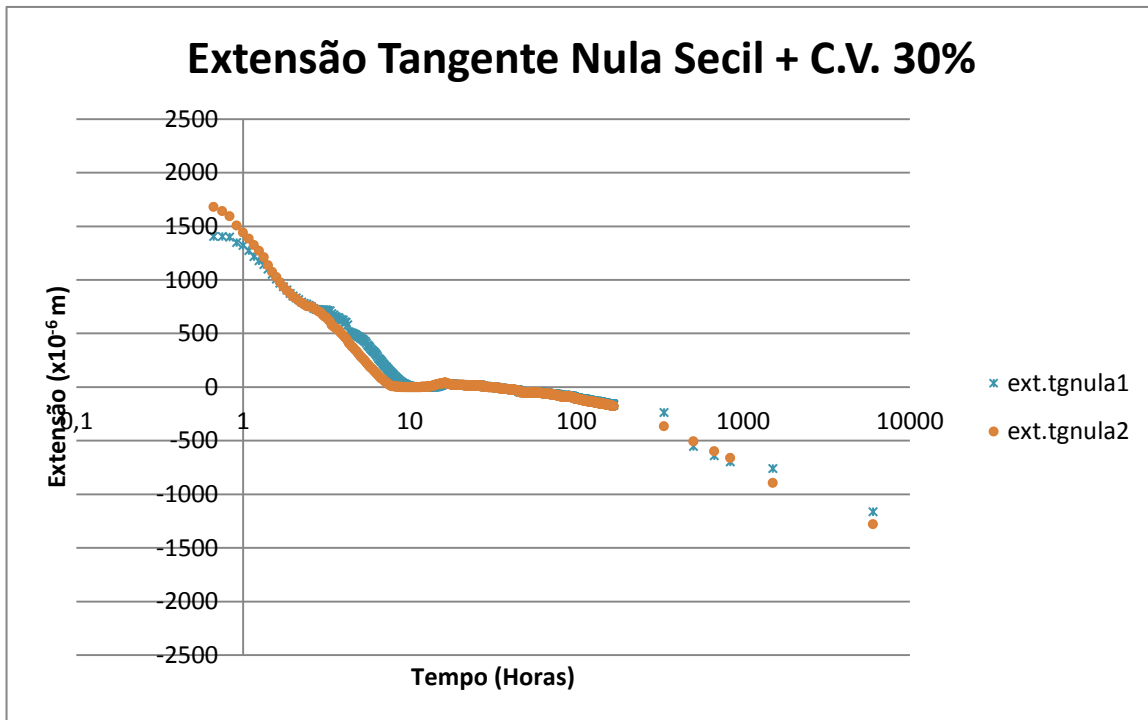


Gráfico 8: Extensão Fim de Presa Secil Cinzas Volantes 30% (leituras automáticas)



*Gráfico 9: Extensão Tangente Nula Secil + Cinzas Volantes 30%*

Esta pasta contém uma substituição de 30% do cimento por cinzas volantes, representando 660 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

Ao longo das primeiras horas dá-se um acréscimo significativo da retracção autogénea, terminando esta escalada perto do fim de presa que se dá ao minuto 655.

Por fim no gráfico 9 é possível observar-se a evolução da extensão após a tangente nula, onde se confirma a aproximação de valores dos 2 provetes, terminando os 2 provetes bastante próximos em valores medidos.

#### 5.4. Pasta Secil + Metacaulino 10%

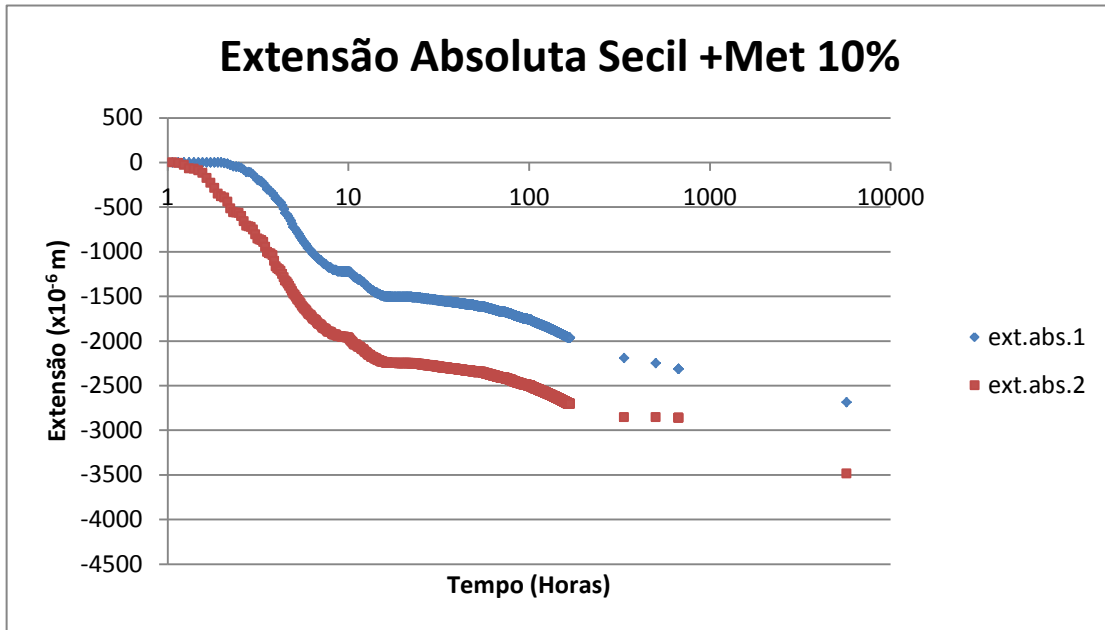


Gráfico 10: Extensão Absoluta Secil +Metacaulino 10%

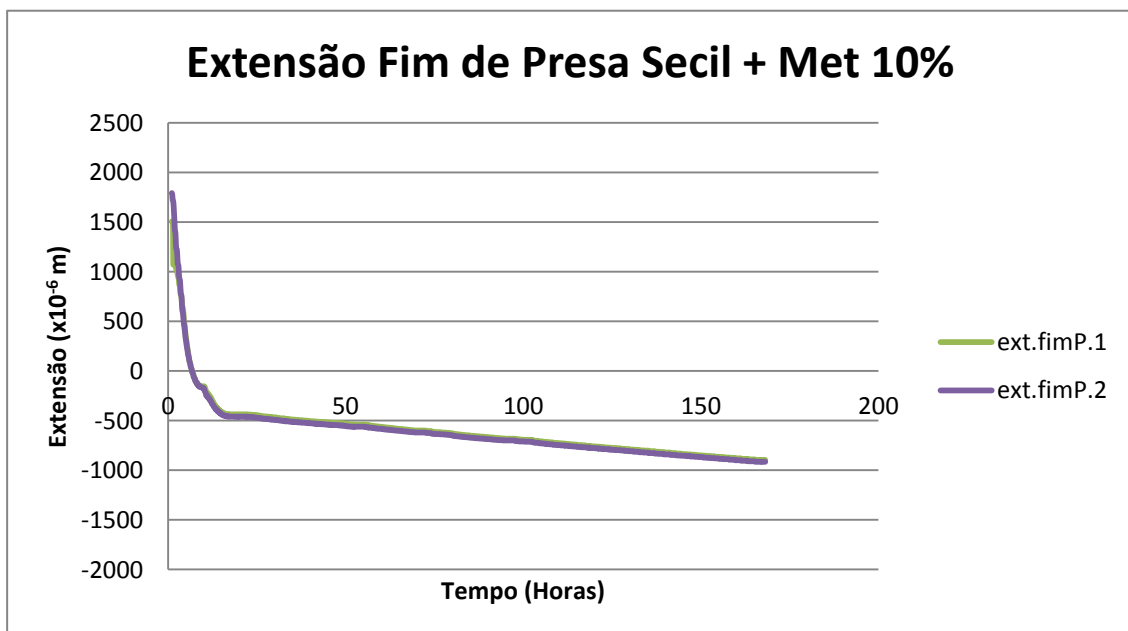
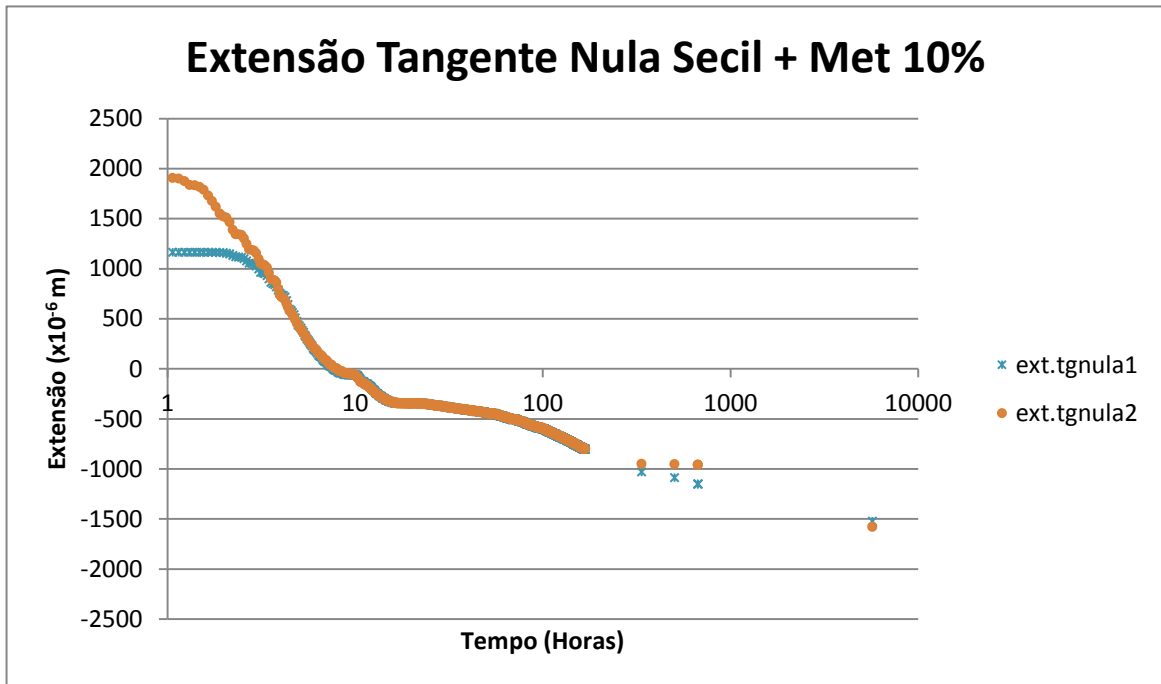


Gráfico 11: Extensão Fim de Presa Secil + Metacaulino 10% (leituras automáticas)



*Gráfico 12: Extensão Tangente Nula Secil + Metacaulino 10%*

A pasta contém uma substituição de 10% do cimento por metacaulino.

Ao longo das primeiras horas dá-se um acréscimo significativo da retracção autogénea, terminando esta escalada já algum tempo depois do fim de presa que se dá ao minuto 460.

Por fim no gráfico 12 é possível observar-se a evolução da extensão após a tangente nula, onde se confirma a aproximação de valores dos 2 provetes, terminando no entanto os 2 provetes bastante próximos em valores medidos.

### 5.5. Pasta Secil + Metacaulino 20%

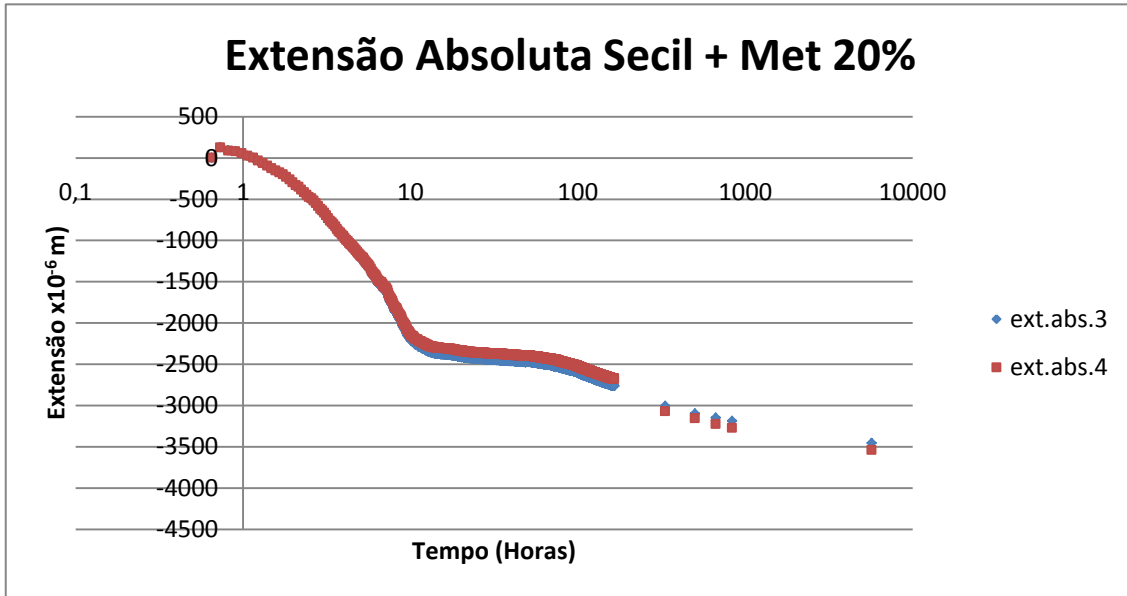


Gráfico 13: Extensão Absoluta Secil + Metacaulino 20%

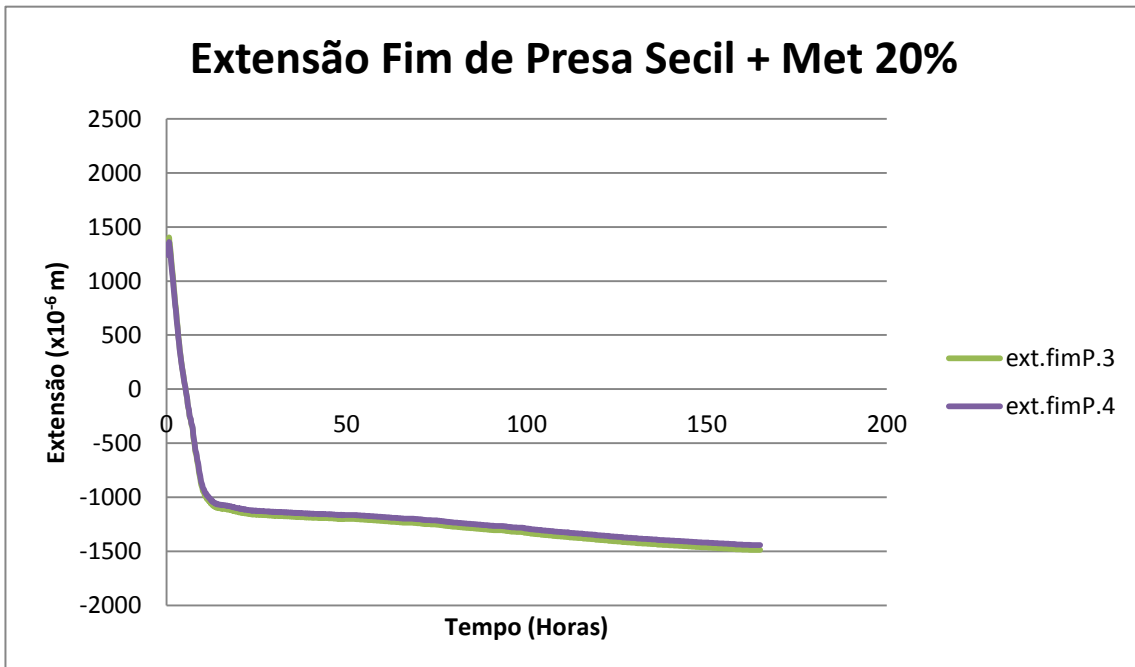
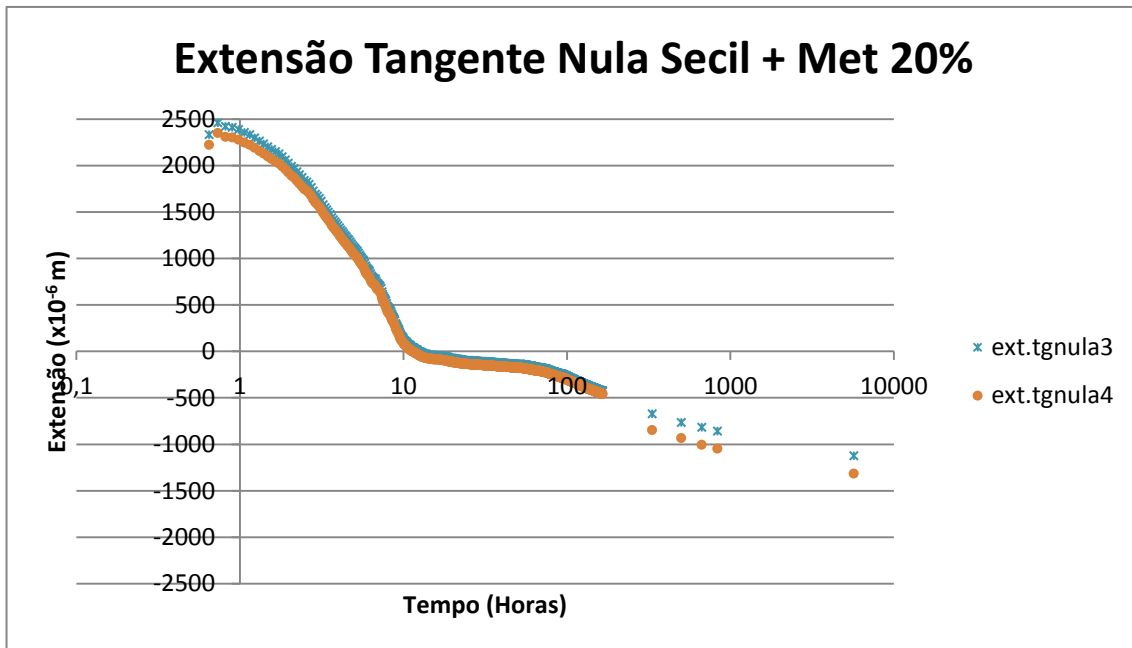


Gráfico 14: Extensão Fim de Presa Secil + Metacaulino 20% (leituras automáticas)





*Gráfico 15: Extensão Tangente Nula Secil + Metacaulino 20%*

A pasta contém uma substituição de 20% do cimento por metacaulino, representando 440 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

O comportamento deste provete vai de encontro às últimas pastas apresentadas.

### 5.6. Pasta Secil + Silica de Fumo 5%

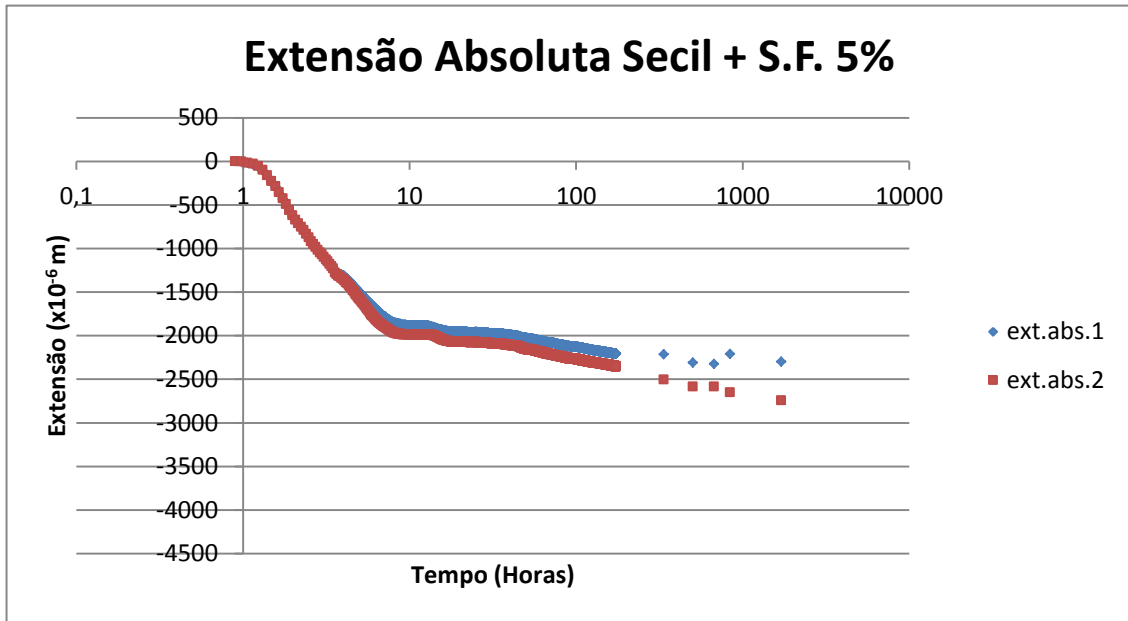


Gráfico 16: Extensão Absoluta Secil + Sílica de Fumo 5%

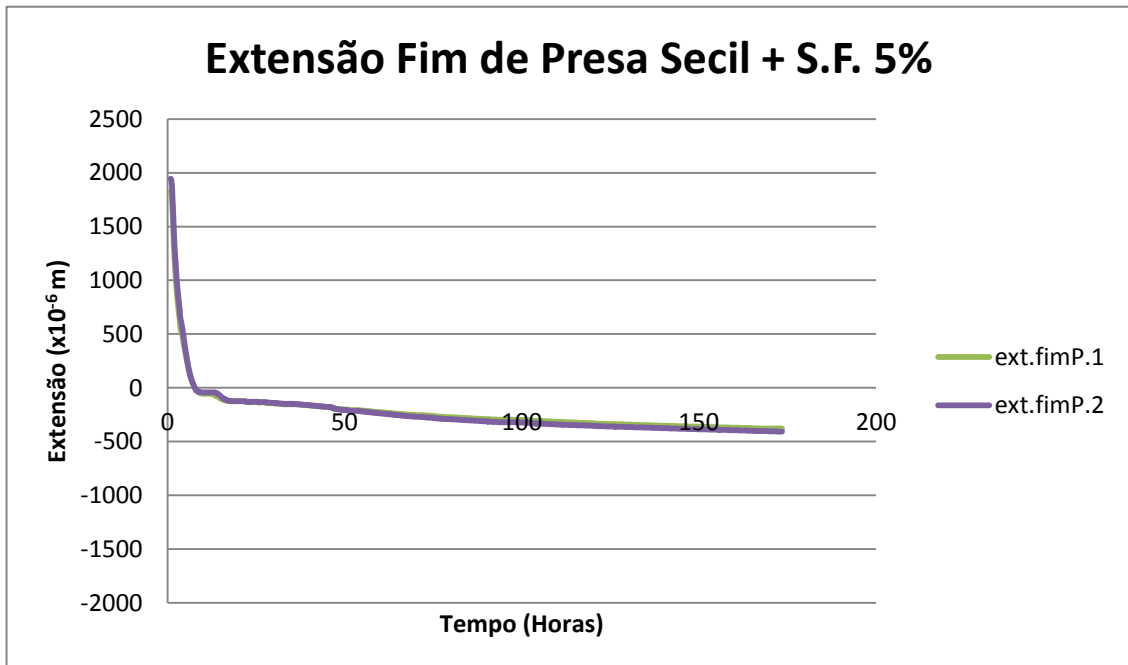
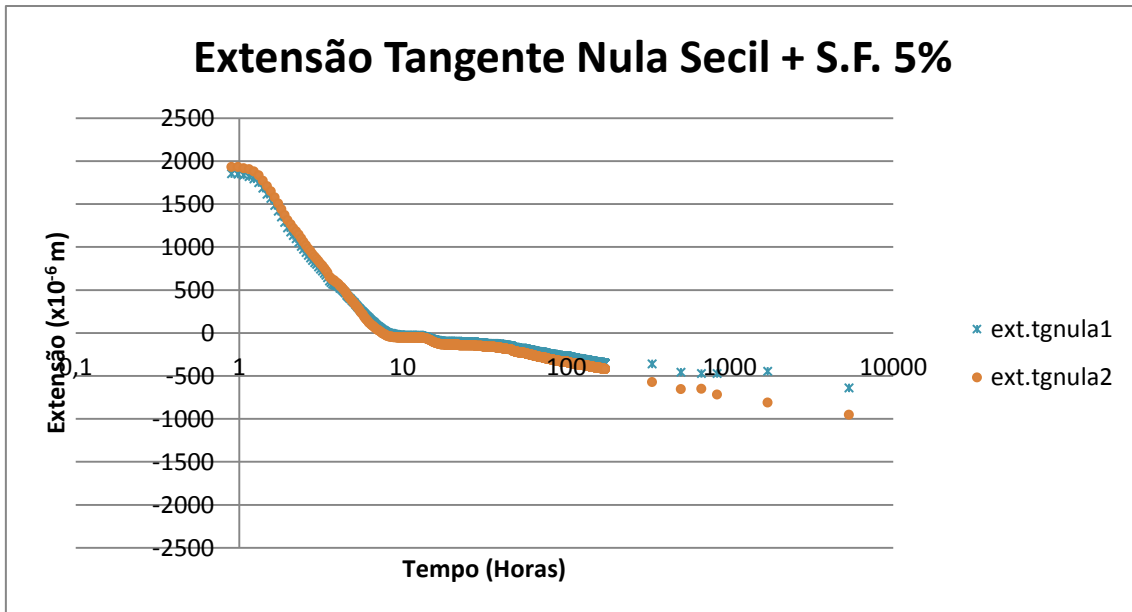


Gráfico 17: Extensão Fim de Presa Secil + Sílica de Fumo 5% (leituras automáticas)



*Gráfico 18: Extensão Tangente Nula Secil + Sílica de Fumo 5%*

A pasta contém uma substituição de 5% do cimento por sílica de fumo, representando 110 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

A nível do gráfico 17, o comportamento é similar ao apresentado até agora.

No gráfico 18 é possível observar-se a evolução da extensão após a tangente nula, onde se confirma a aproximação de valores dos 2 provetes, sendo que a dada altura o provete 1 tem um comportamento divergente face ao 2 que continua com um decréscimo uniforme. Este diferente comportamento diferente pode estar associado com a incerteza da metodologia manual de medição.

### 5.7. Pasta Secil + Silica de Fumo 10%

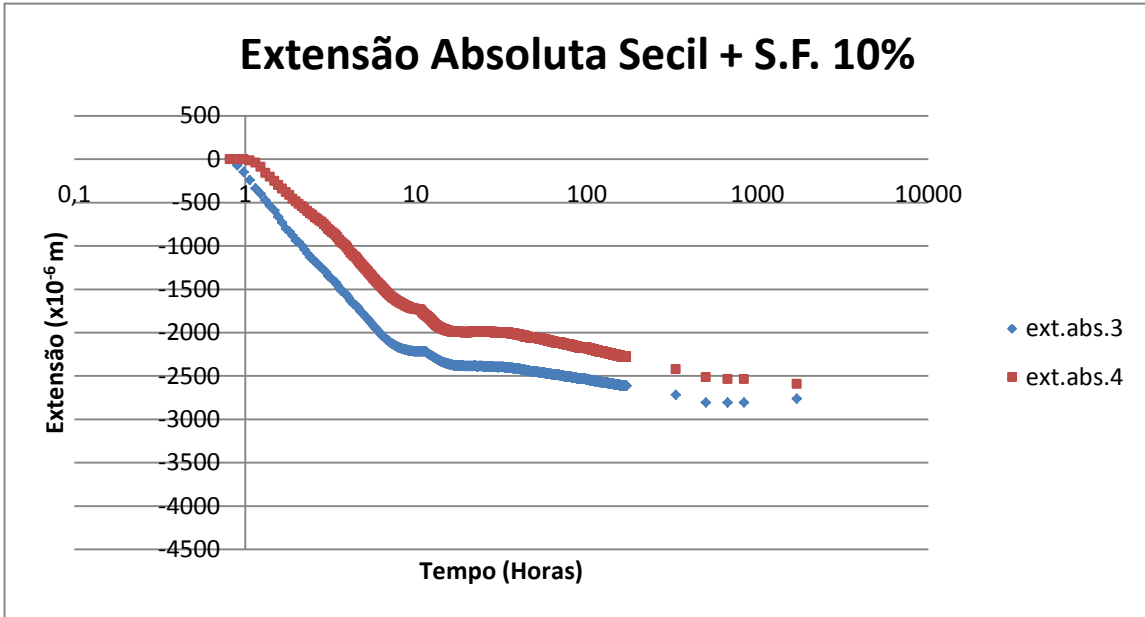


Gráfico 19: Extensão Absoluta Secil + Sílica de Fumo 10%

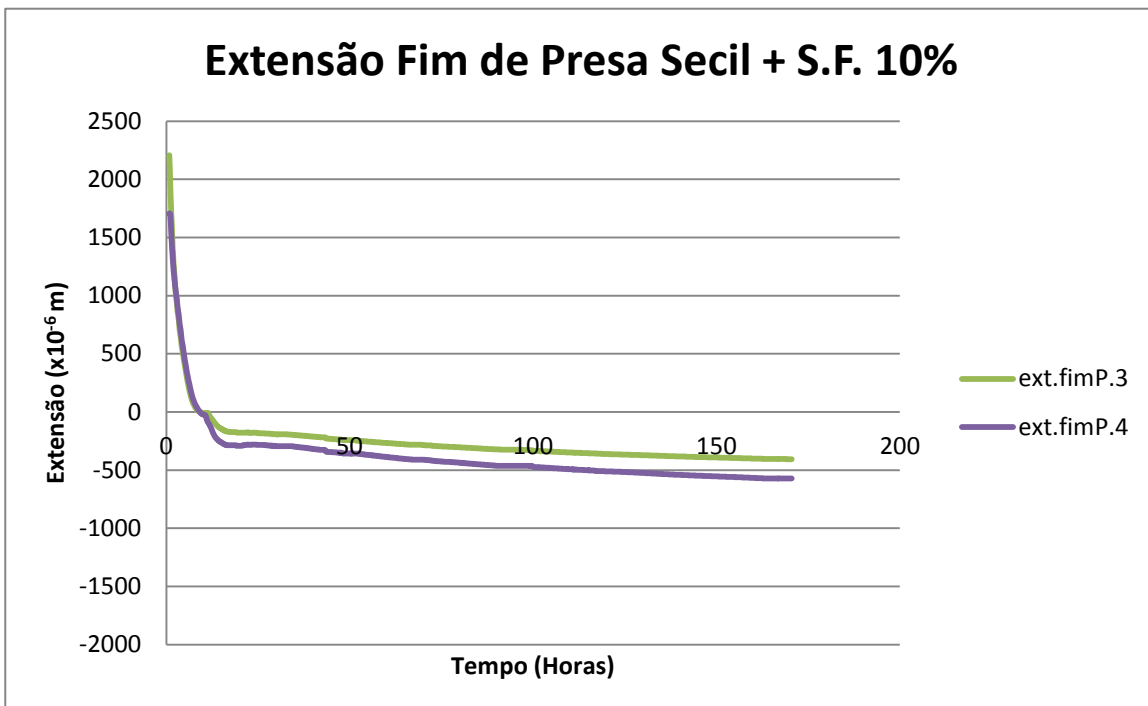
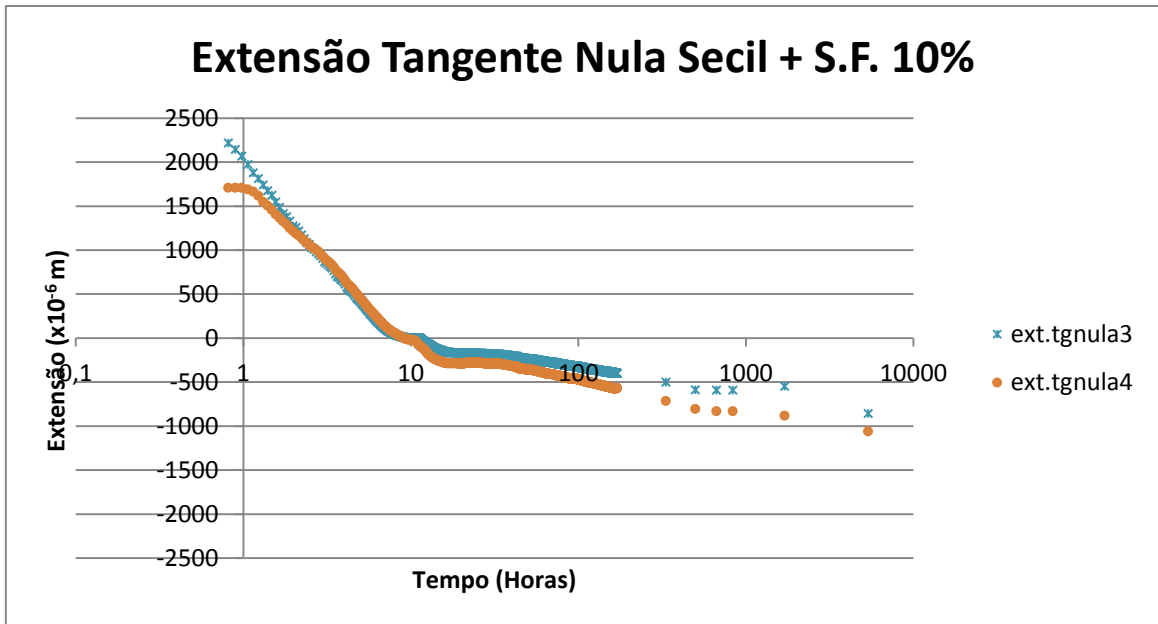


Gráfico 20: Extensão Fim de Presa Secil + Sílica de Fumo 10% (leituras automáticas)



*Gráfico 21: Extensão Tangente Nula Secil + Sílica de Fumo 10%*

A pasta contém uma substituição de 10% do cimento por sílica de fumo.

No gráfico 21 é possível observar-se a evolução da extensão após a tangente nula, onde se confirma a aproximação de valores dos 2 provetes, sendo no final à uma recessão dos valores nos 2 provetes, sendo mais agravado no provete 3. Este diferente comportamento diferente pode estar associado com a incerteza da metodologia manual de medição.

### 5.8. Pasta Secil + Filer Calcário 15%

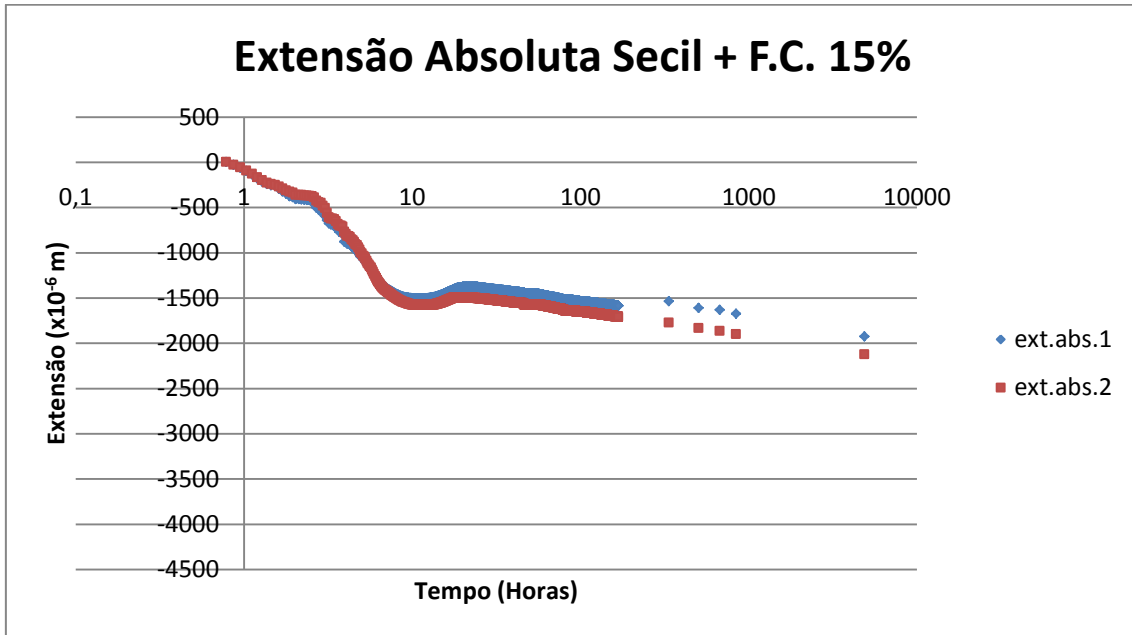


Gráfico 22: Extensão Absoluta Secil + Filer Calcário 15%

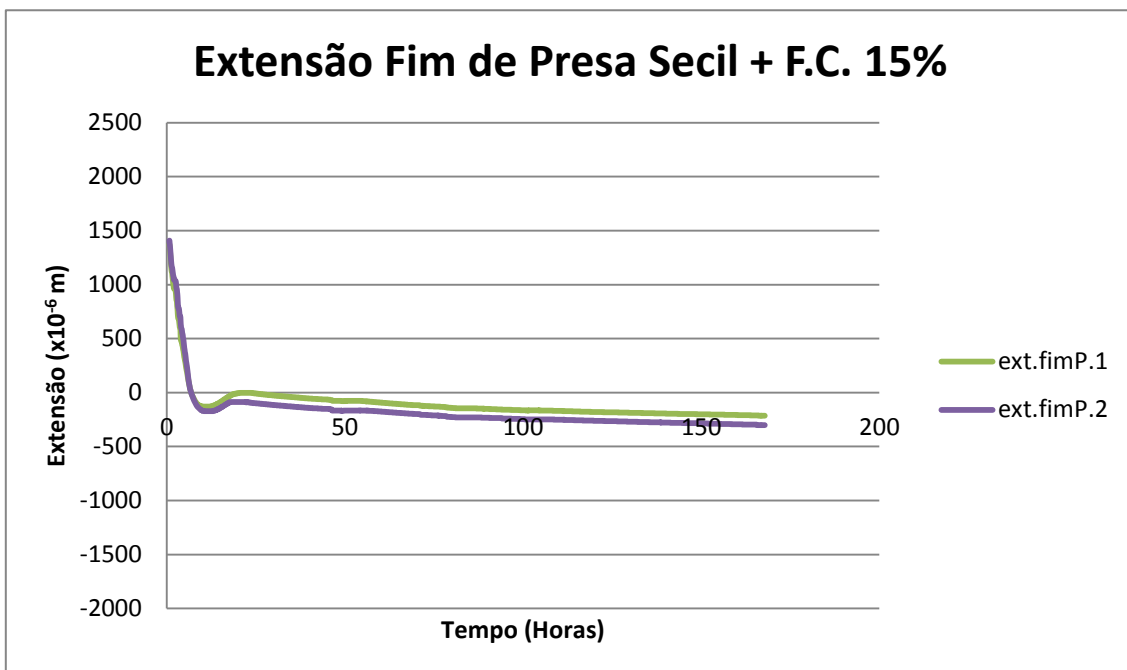


Gráfico 23: Extensão Fim de Presa Secil + Filer Calcário 15% (leituras automáticas)

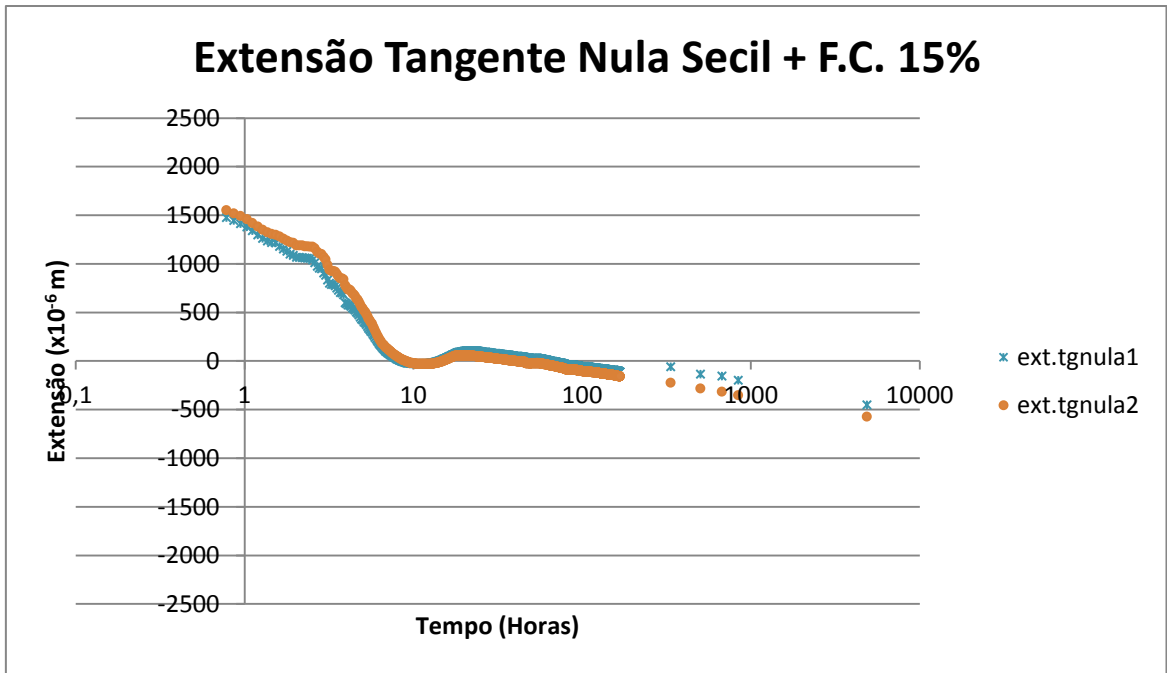


Gráfico 24: Extensão Tangente Nula Secil + Filer Calcário 15%

A pasta contém uma substituição de 15% do cimento por filer calcário, representando 330 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

É possível observar-se neste provete, um comportamento na linha do já abordado até aqui.

### 5.9. Pasta Secil + Filer Calcário 30%

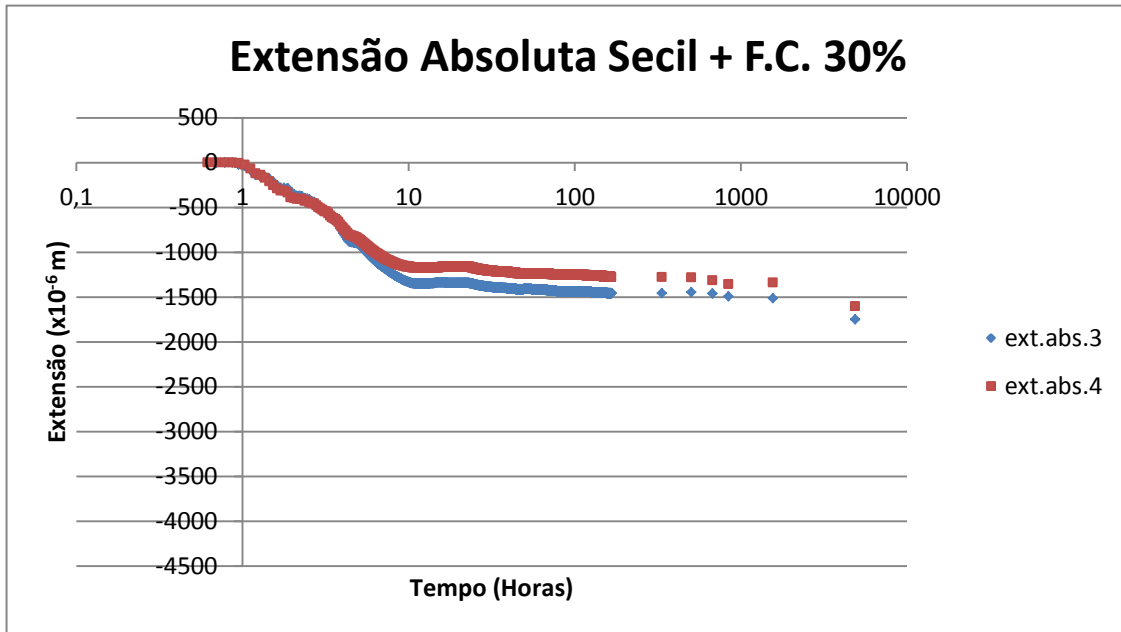


Gráfico 25: Extensão Absoluta Secil + Filer Calcário 30%

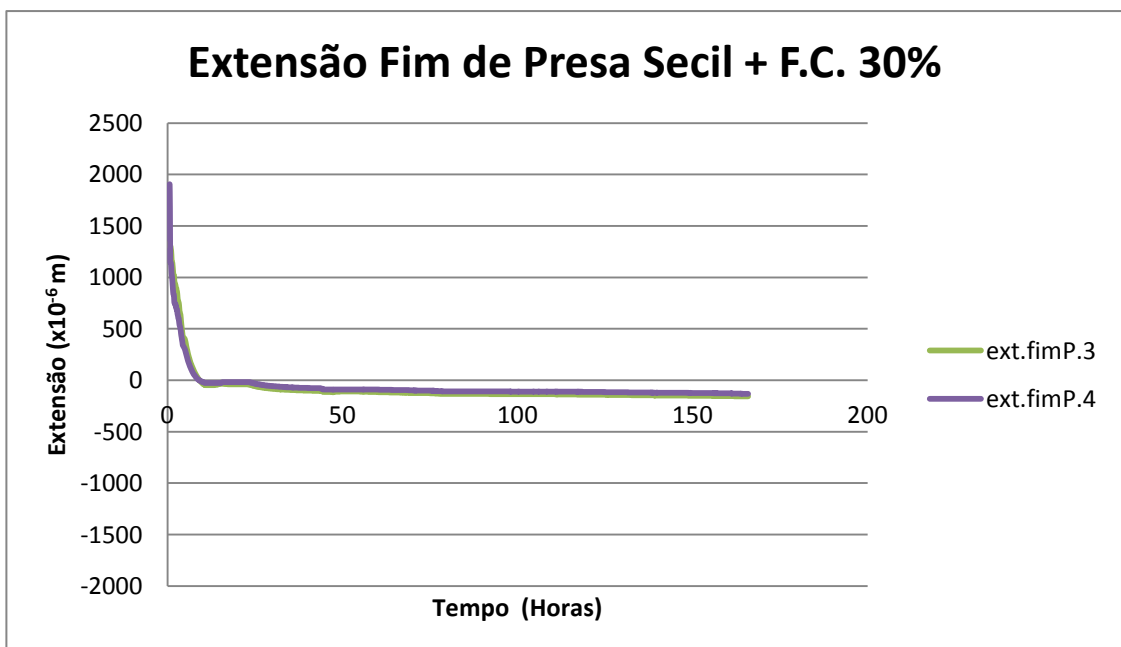


Gráfico 26: Extensão Fim de Presa Secil + Filer Calcário 30% (leituras automáticas)



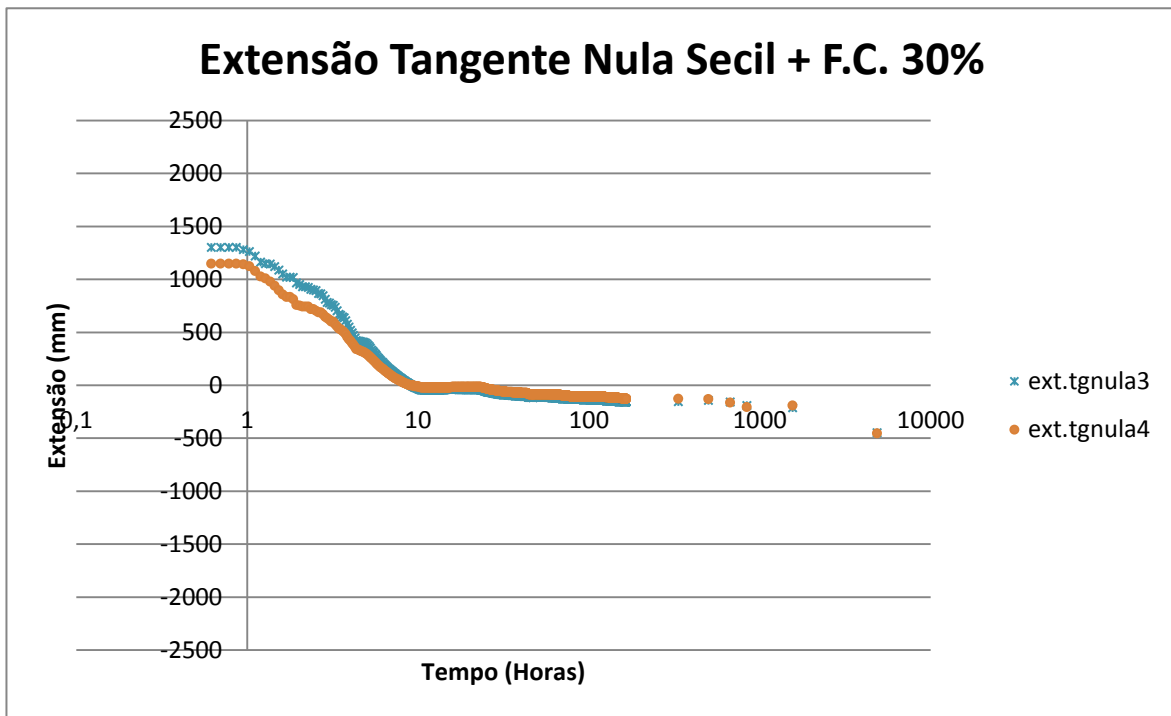


Gráfico 27: Extensão Tangente Nula Secil + Filer Calcário 30%

A pasta contém uma substituição de 30% do cimento por filer calcário, representando 660 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

É possível observar-se neste provete, um comportamento na linha do já abordado até aqui.

### 5.10. Pasta referência Cimpor padrão

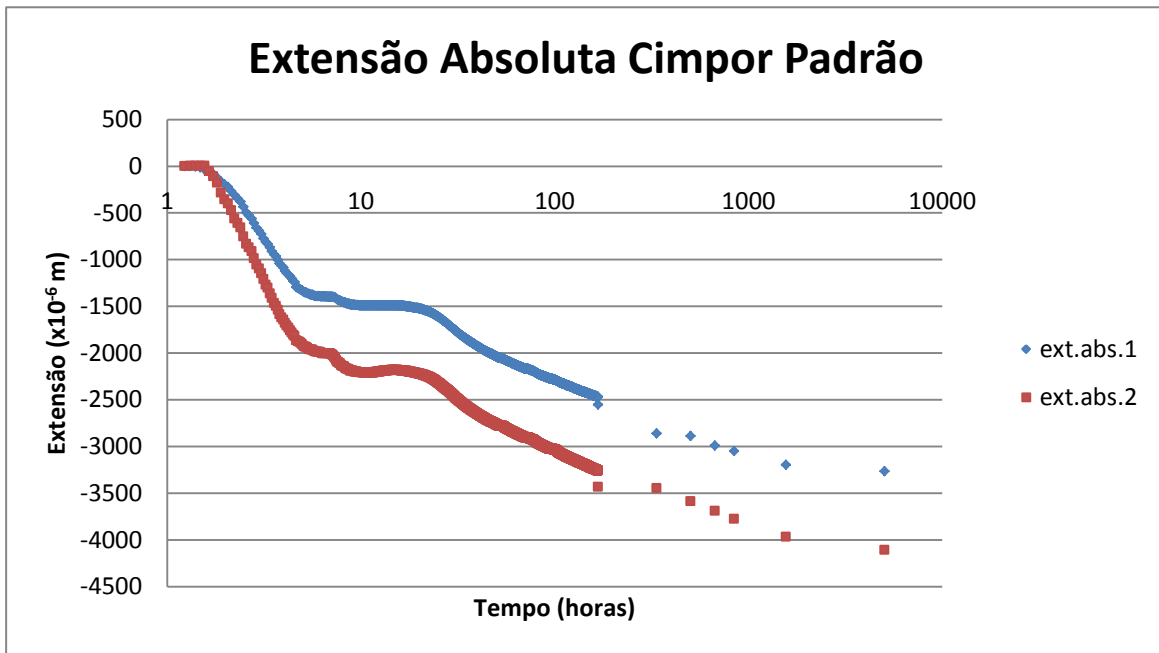


Gráfico 28: Extensão Absoluta Cimpor Padrão

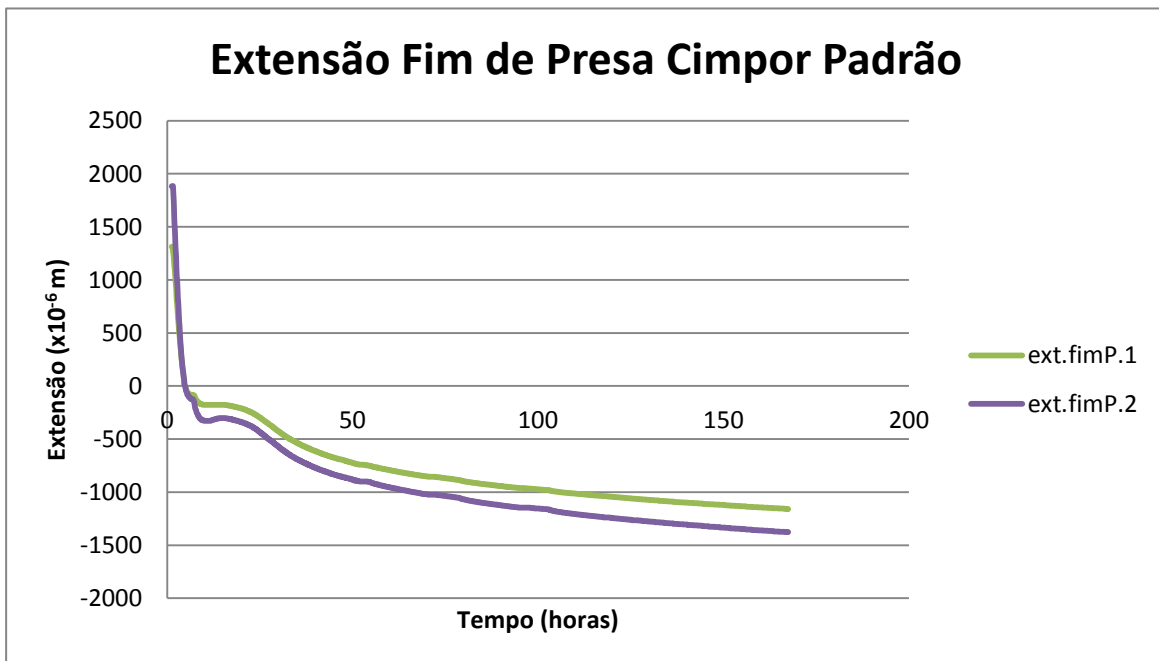


Gráfico 29: Extensão Fim de Presa Cimpor Padrão (leituras automáticas)

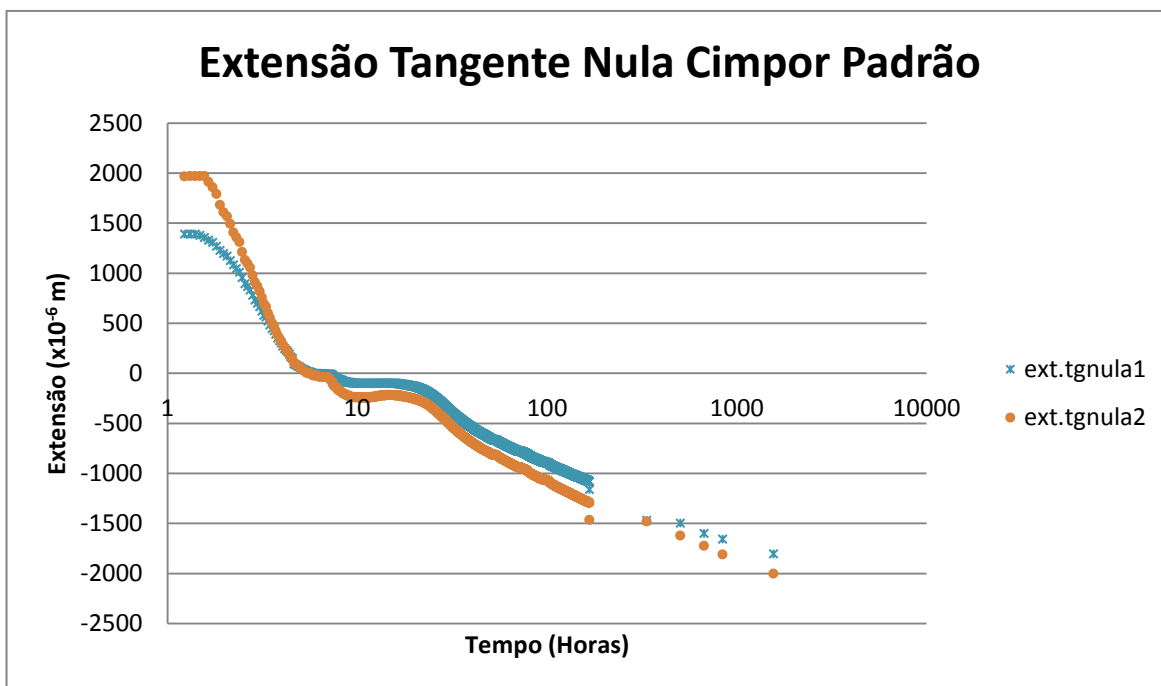


Gráfico 30: Extensão Tangente Nula Cimpor Padrão

A pasta de referência apenas têm o cimento base, sem qualquer tipo de adição, as dosagens das pastas estão já apresentadas no quadro 1 desta dissertação.

É visível no Gráfico 28 que o maior incremento na retracção autogénea se desenvolve ao longo das primeiras horas de ensaio, que por sua vez representa o tempo até ao fim de presa que ocorre ao minuto 365, sensivelmente perto das 6 horas de ensaio.

No gráfico 29 é possível observar-se o andamento paralelo das 2 curvas representantes dos 2 provetes ensaiados, o que reflecte um comportamento semelhante por parte dos mesmos ao longo do período de ensaio.

Por fim no gráfico 30 é possível ter uma melhor noção da evolução da retracção.

### 5.11. Pasta Cimpor + Cinzas Volantes 15%

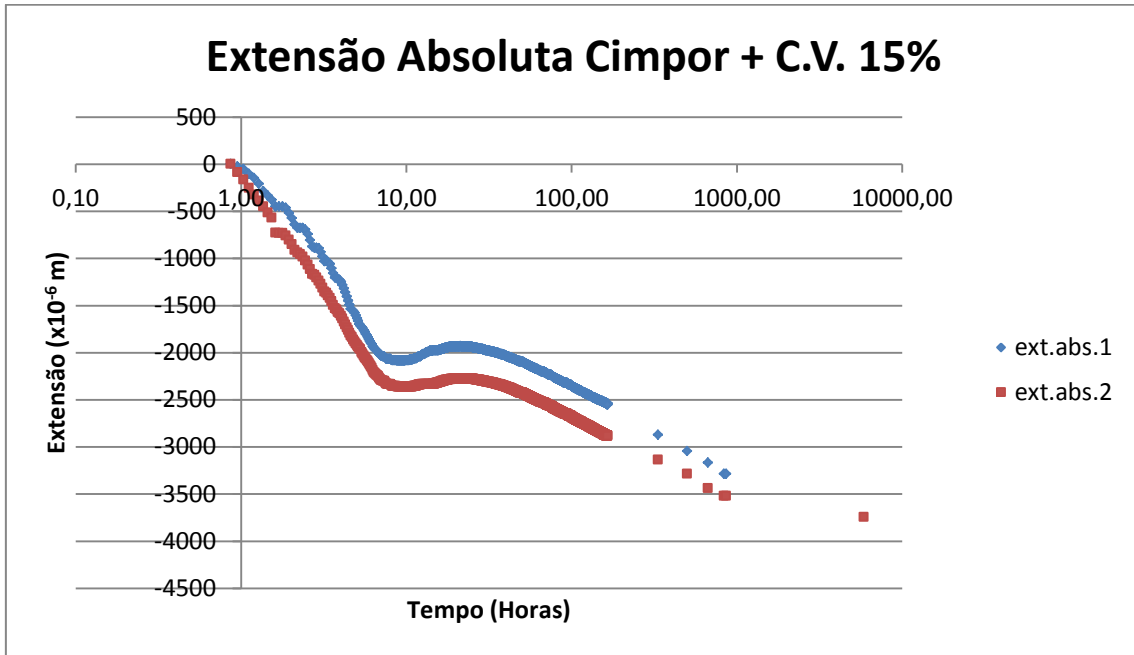


Gráfico 31: Extensão Absoluta Cimpor + Cinzas Volantes 15%

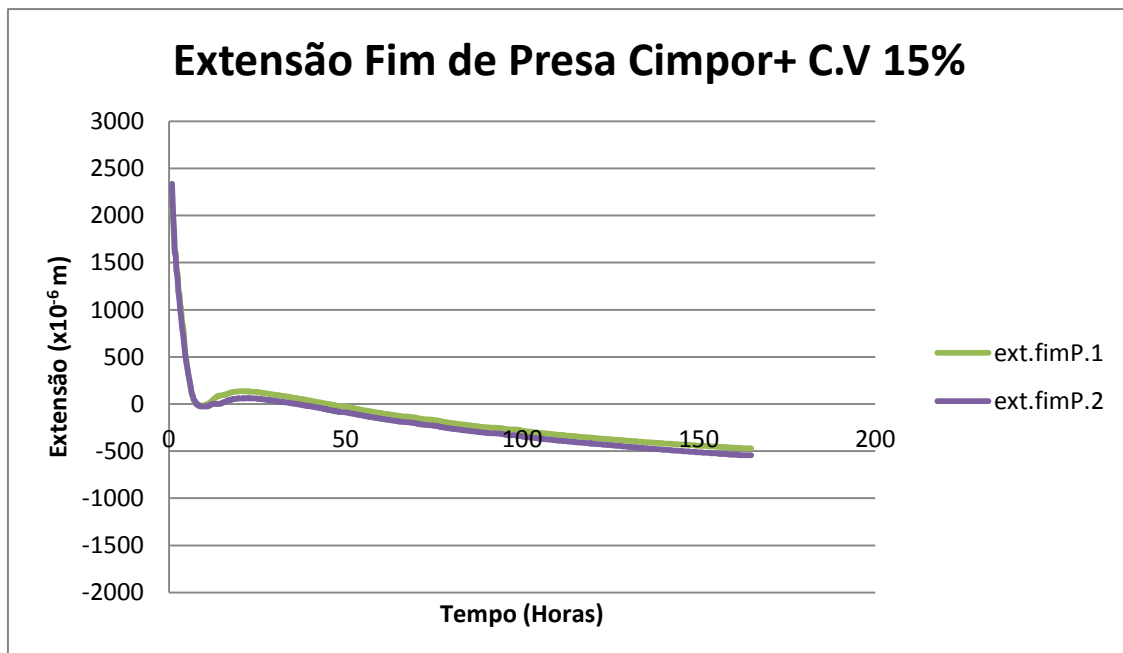
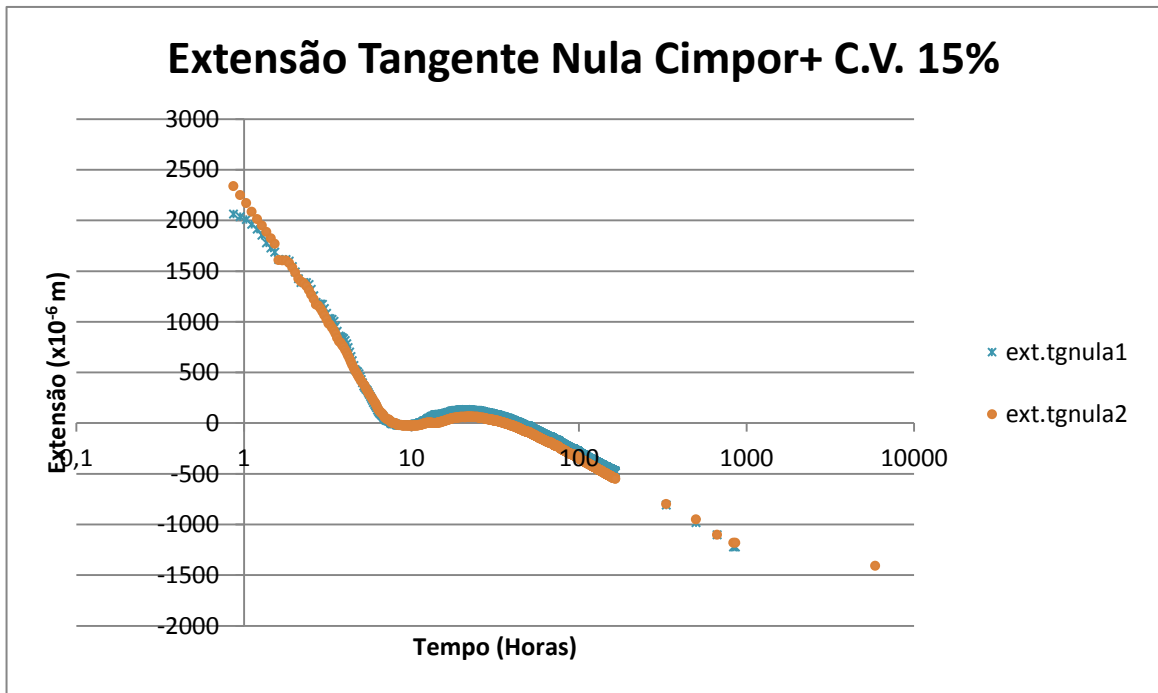


Gráfico 32: Extensão Fim de Presa Cimpor+ Cinzas Volantes 15% (leituras automáticas)



*Gráfico 33: Extensão Tangente Nula Cimpor+ Cinzas Volantes 15%*

A pasta contém uma substituição de 15% do cimento por cinzas volantes, representando 330 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

O andamento é similar ao das outras pastas, sendo que na última medição apenas está presente o provete 2 devido a um problema que impediu a medição do provete 1.

### 5.12. Pasta Cimpor + Cinzas Volantes 30%

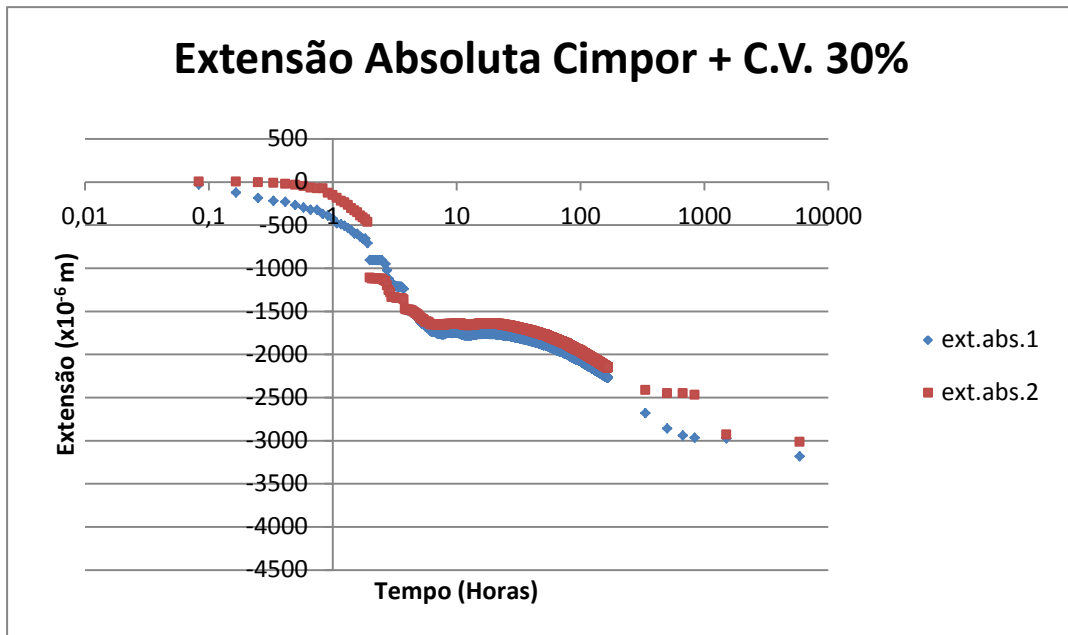


Gráfico 34: Extensão Absoluta Cimpor + Cinzas Volantes 30%

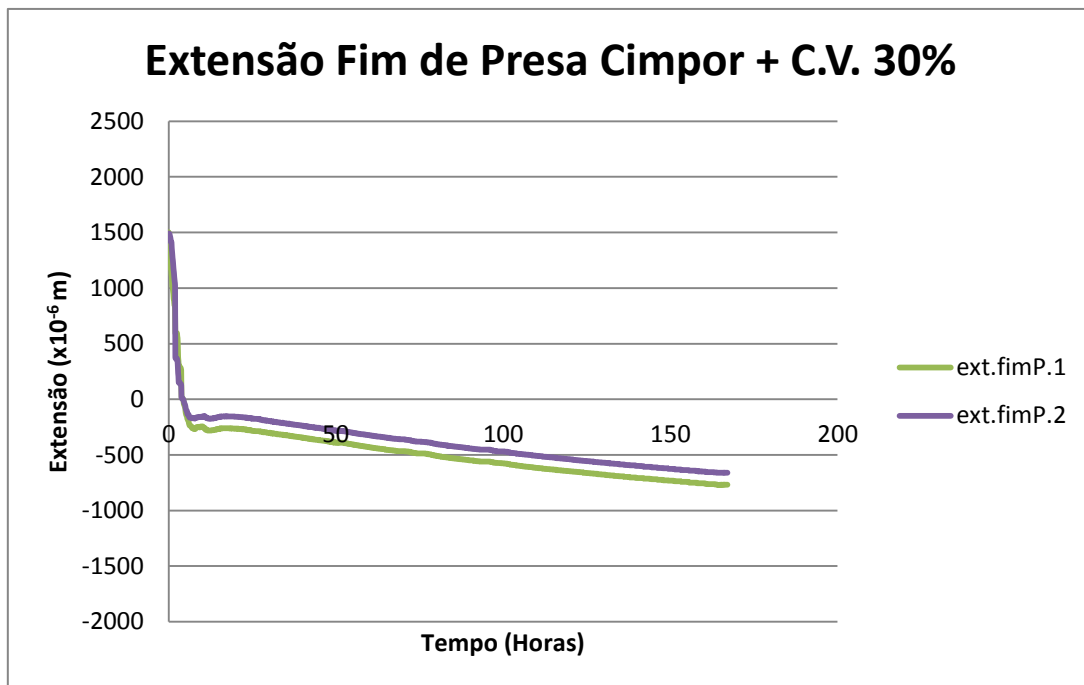
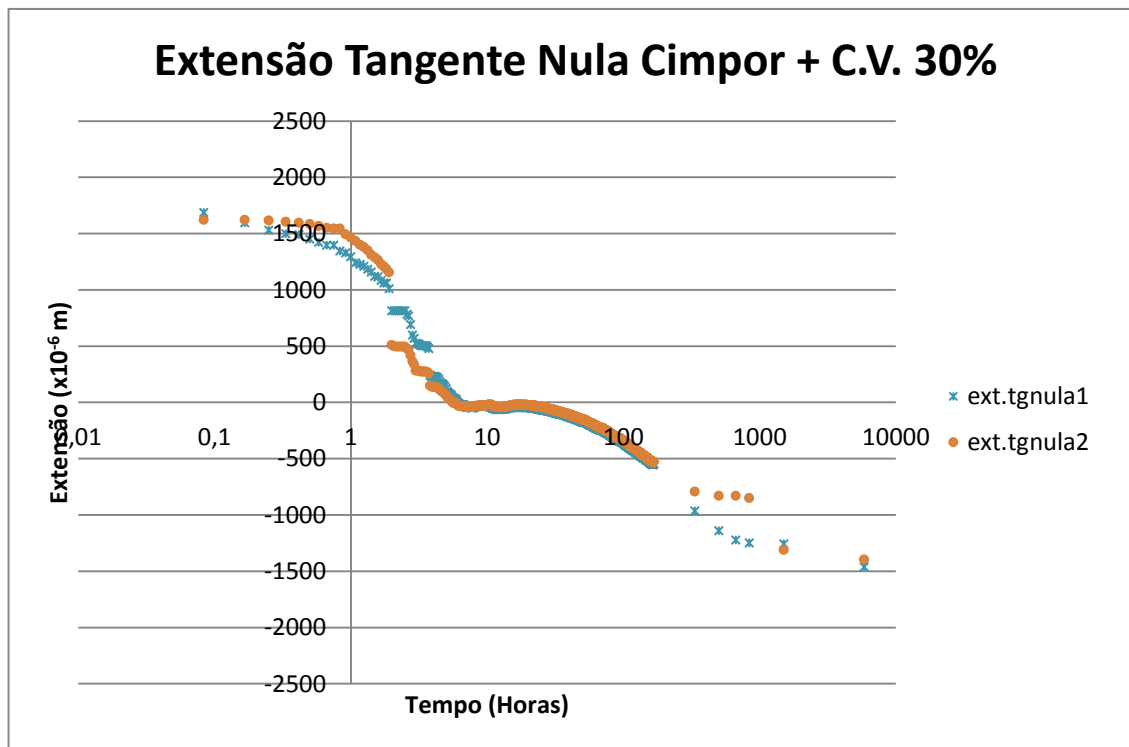


Gráfico 35: Extensão Fim de Presa Cimpor + Cinzas Volantes 30% (leituras automáticas)



*Gráfico 36: Extensão Tangente Nula Cimpor + Cinzas Volantes 30%*

A pasta contém uma substituição de 30% do cimento por cinzas volantes, representando 660 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

O andamento nesta pasta é similar ao das outras pastas já analisadas, sem nenhuma variação a assinalar à exceção diferente comportamento nas últimas medições do provete 2, que poderão estar associados com a incerteza da metodologia da medição.

### 5.13. Pasta Cimpor + Metacaulino 10%

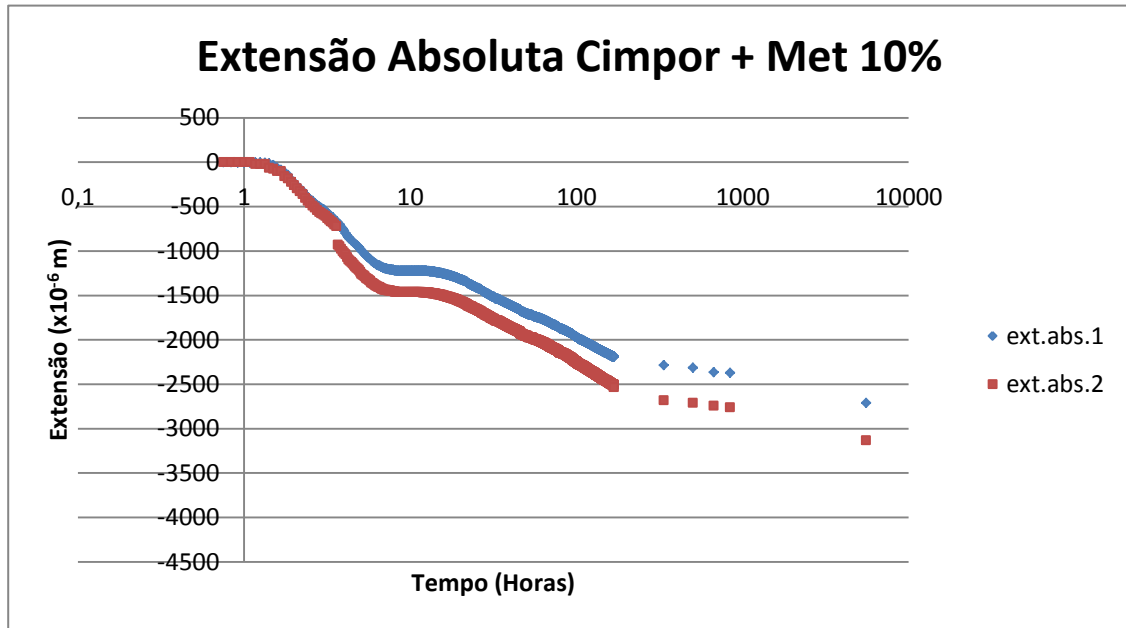


Gráfico 37: Extensão Absoluta Cimpor + Metacaulino 10%

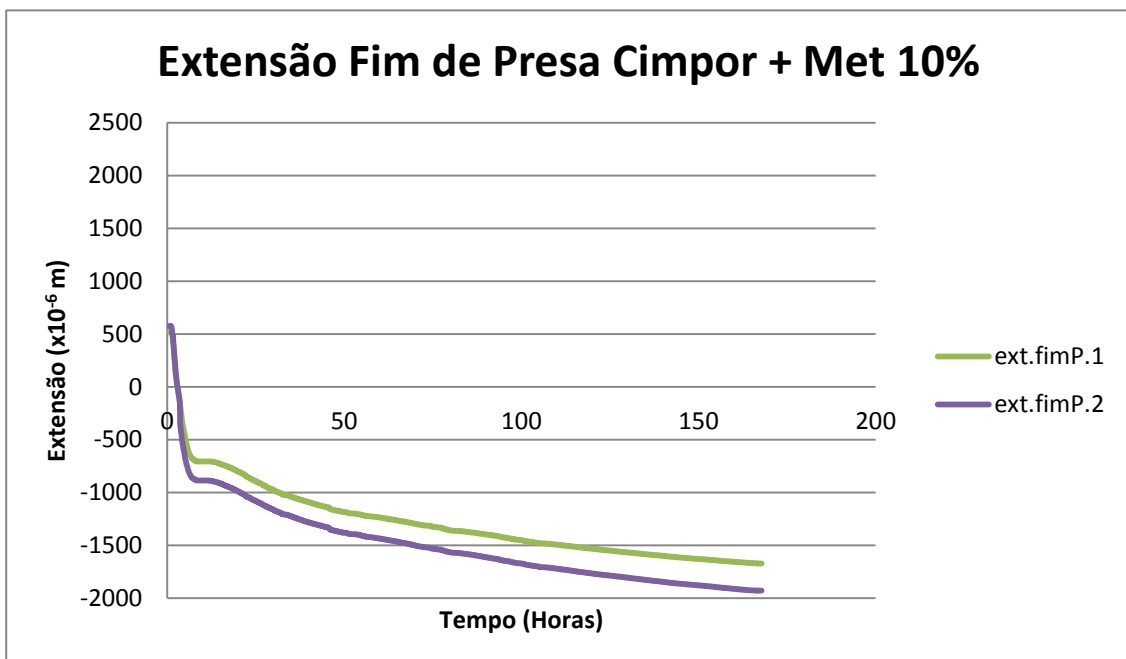
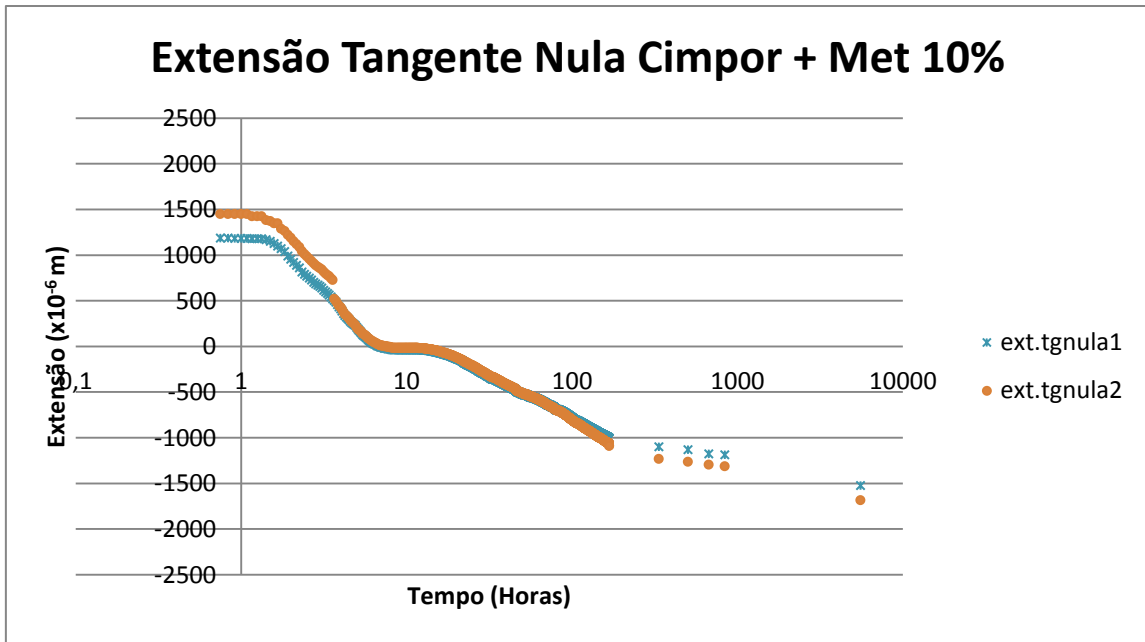


Gráfico 38: Extensão Fim de Presa Cimpor + Metacaulino 10% (leituras automáticas)





*Gráfico 39: Extensão Tangente Nula Cimpor + Metacaulino 10%*

A pasta contém uma substituição de 10% do cimento por metacaulino, representando 220 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

O andamento nesta pasta é similar ao das outras pastas já analisadas, sem nenhuma variação a assinalar.

### 5.14. Pasta Cimpor + Metacaulino 20%

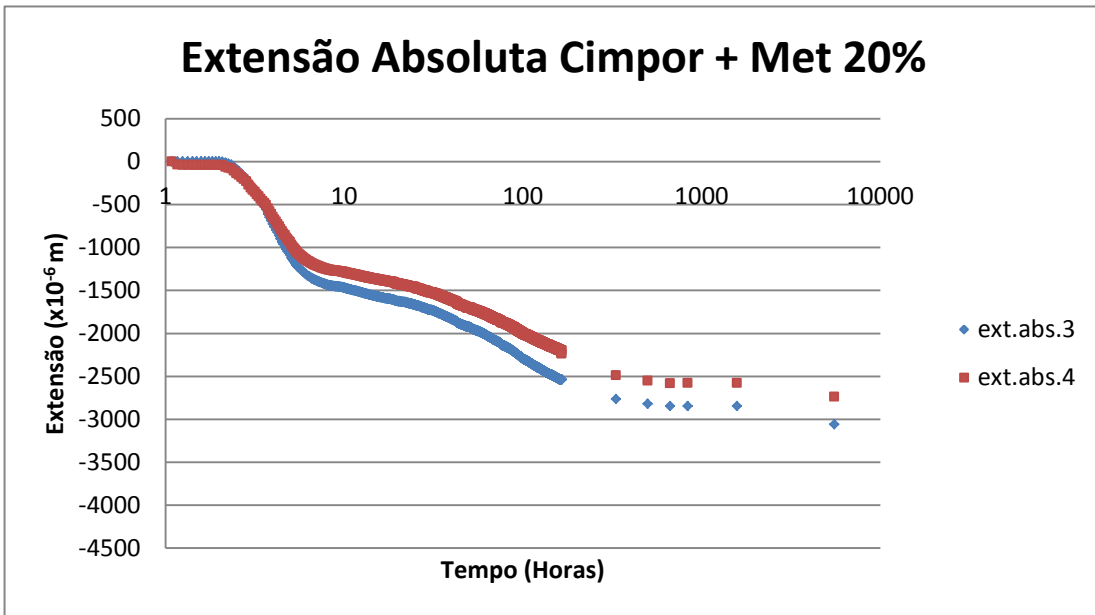


Gráfico 40: Extensão Absoluta Cimpor + Metacaulino 20%

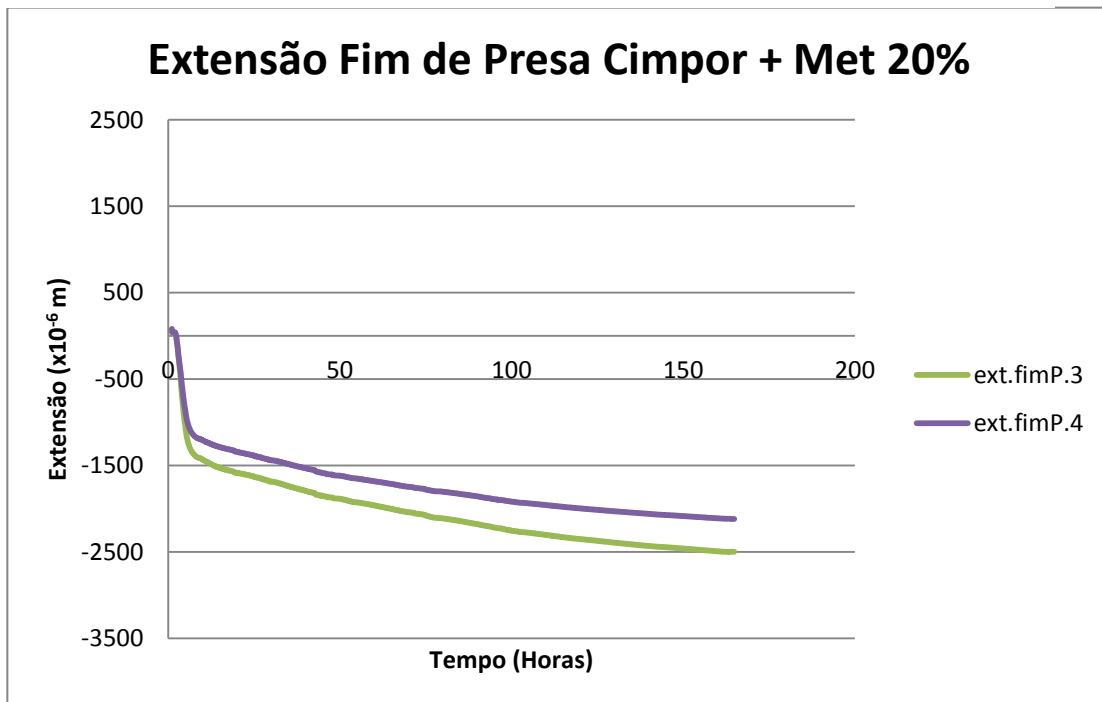
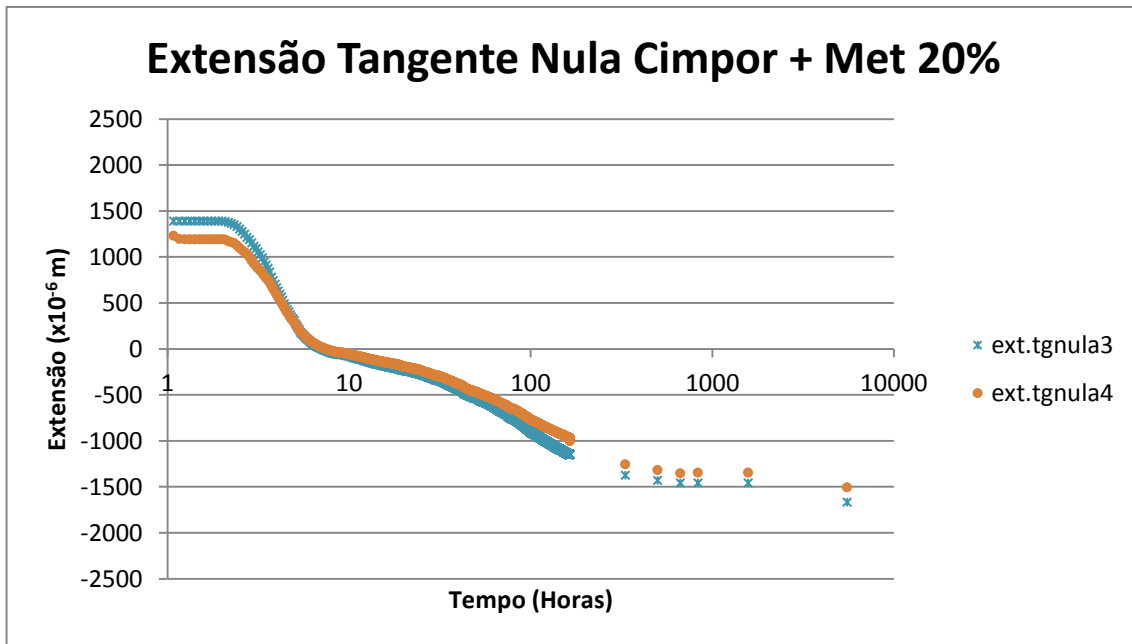


Gráfico 41: Extensão Fim de Presa Cimpor + Metacaulino 20% (leituras automáticas)



*Gráfico 42: Extensão Tangente Nula Cimpor + Metacaulino 20%*

A pasta contém uma substituição de 20% do cimento por metacaulino, representando 440 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

O andamento nesta pasta é similar ao das outras pastas já analisadas, sem nenhuma variação a assinalar.

### 5.15. Pasta Cimpor + Sílica de Fumo 5%

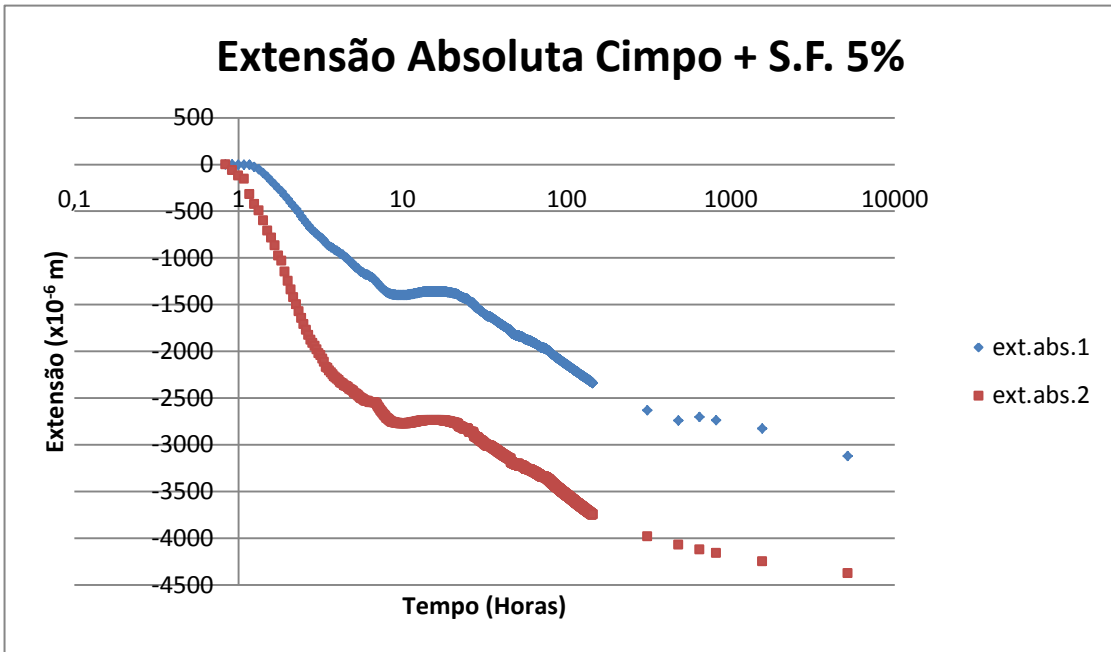


Gráfico 43: Extensão Absoluta Cimpor + Sílica de Fumo 5%

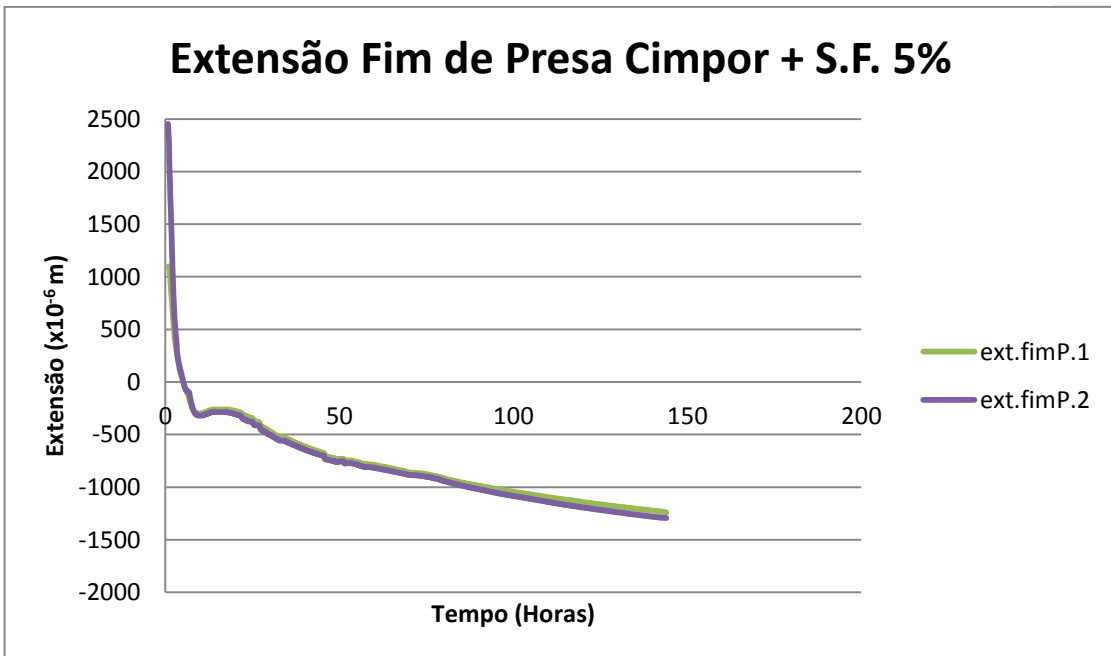


Gráfico 44: Extensão Fim de Presa Cimpor + Sílica de Fumo 5% (leituras automáticas)

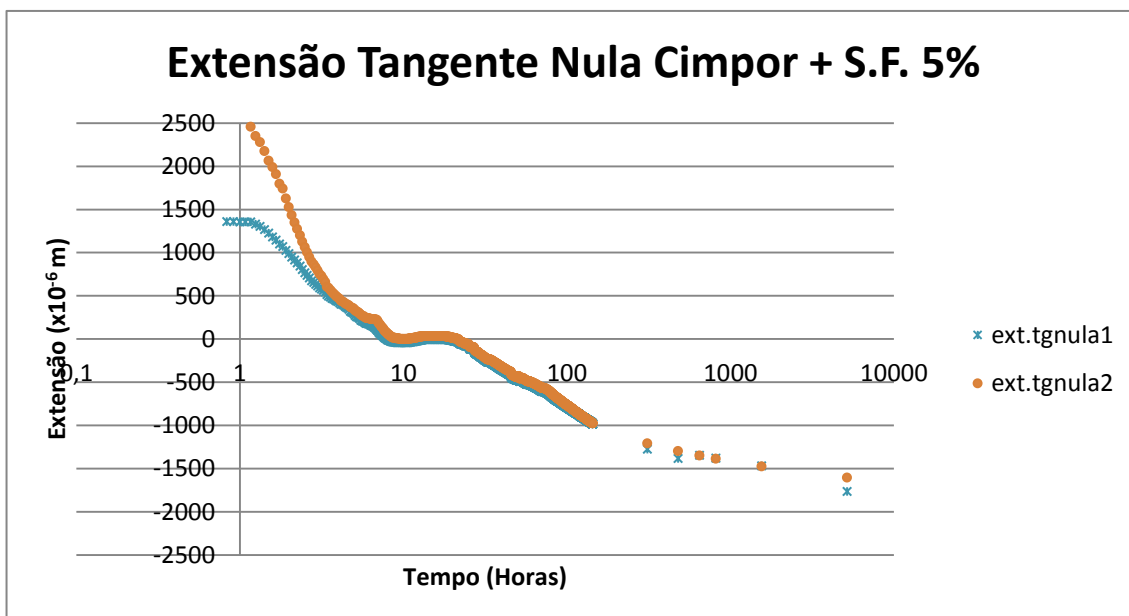


Gráfico 45: Extensão Tangente Nula Cimpor + Sílica de Fumo 5%

A pasta contém uma substituição de 5% do cimento por sílica de fumo, representando 110 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

Ao longo das primeiras horas dá-se um acréscimo significativo da retracção autogénea, terminando esta escalada depois do fim de presa que se dá ao minuto 360.

O comportamento dos 2 provetes após o fim de presa é bastante idêntico como pode ser testemunhado pela sobreposição dos gráficos ao longo do tempo.

Por fim no gráfico 45 é possível observar-se a evolução da extensão após a tangente nula, onde se confirma a aproximação de valores dos 2 provetes, sendo que a dada altura o provete 1 tem um comportamento divergente face ao 2 que continua com um decréscimo uniforme.

### 5.16. Pasta Cimpor + Sílica de Fumo 10%

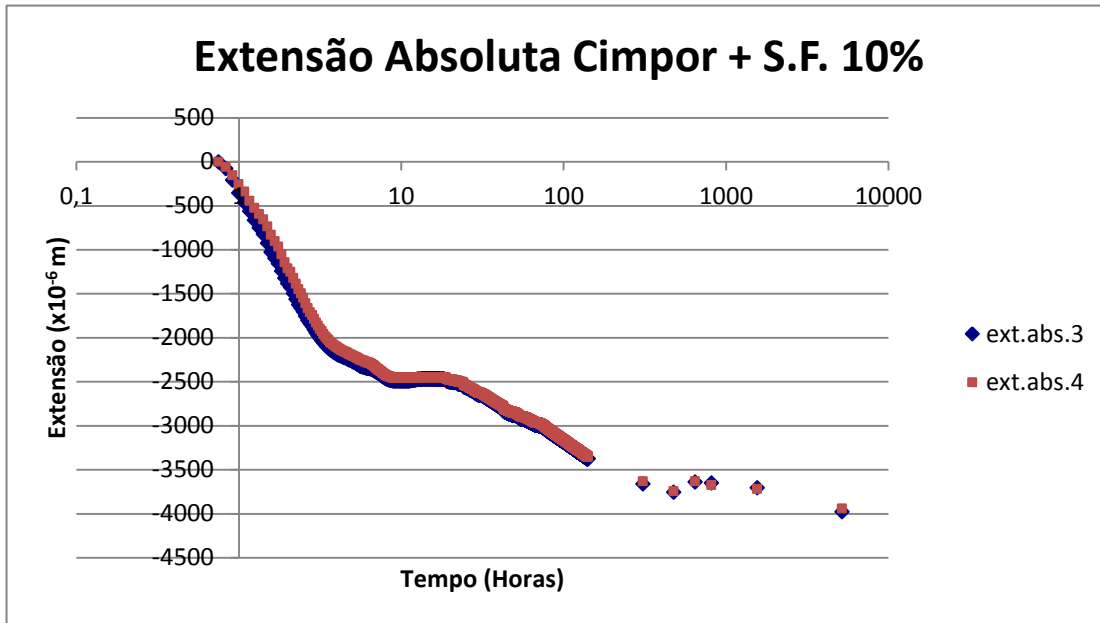


Gráfico 46: Extensão Absoluta Cimpor + Sílica de Fumo 10%

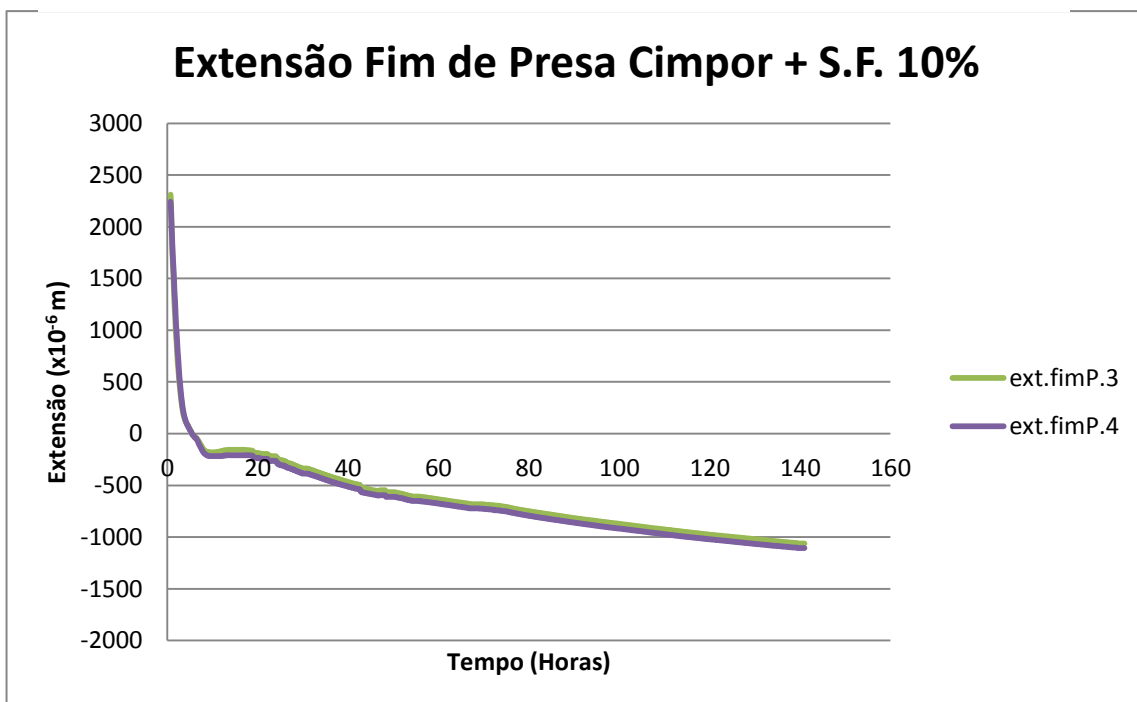
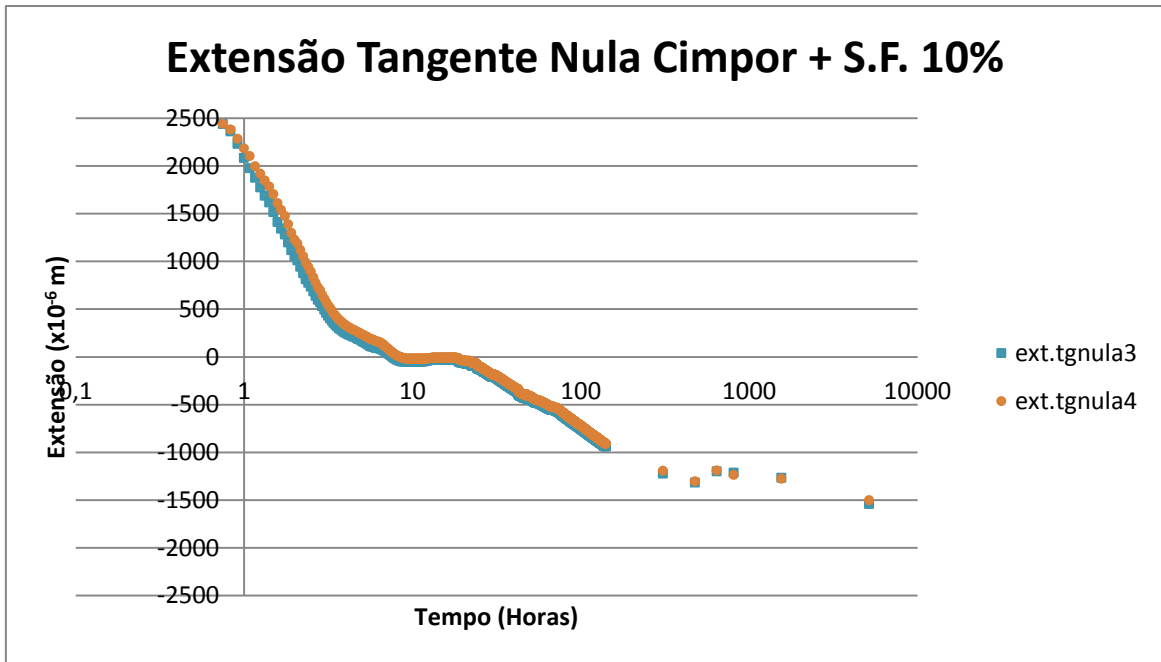


Gráfico 47: Extensão Fim de Presa Cimpor + Sílica de Fumo 10%  
(leituras automáticas)



*Gráfico 48: Extensão Tangente Nula Cimpor + Sílica de Fumo 10%*

A pasta contém uma substituição de 10% do cimento por sílica de fumo, representando 220 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

O andamento nesta pasta é similar ao das outras pastas já analisadas, sem nenhuma variação a assinalar

5.17. Pasta Cimpor + Filér calcário 15%

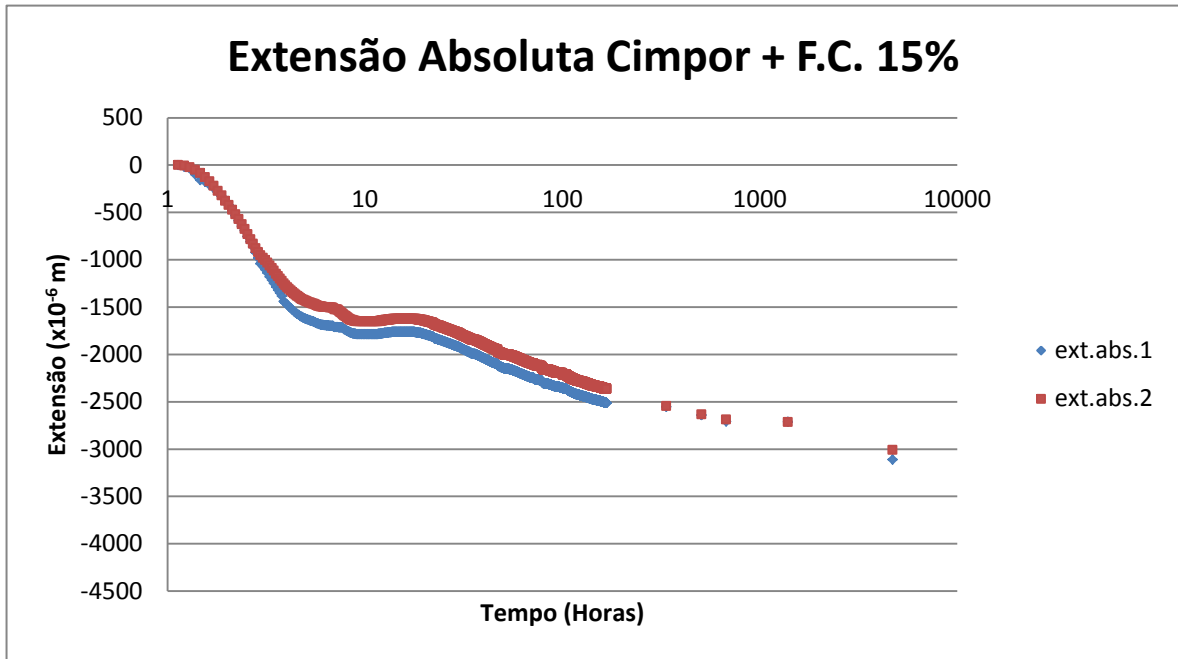


Gráfico 49: Extensão Absoluta Cimpor + Filer Calcário 15%

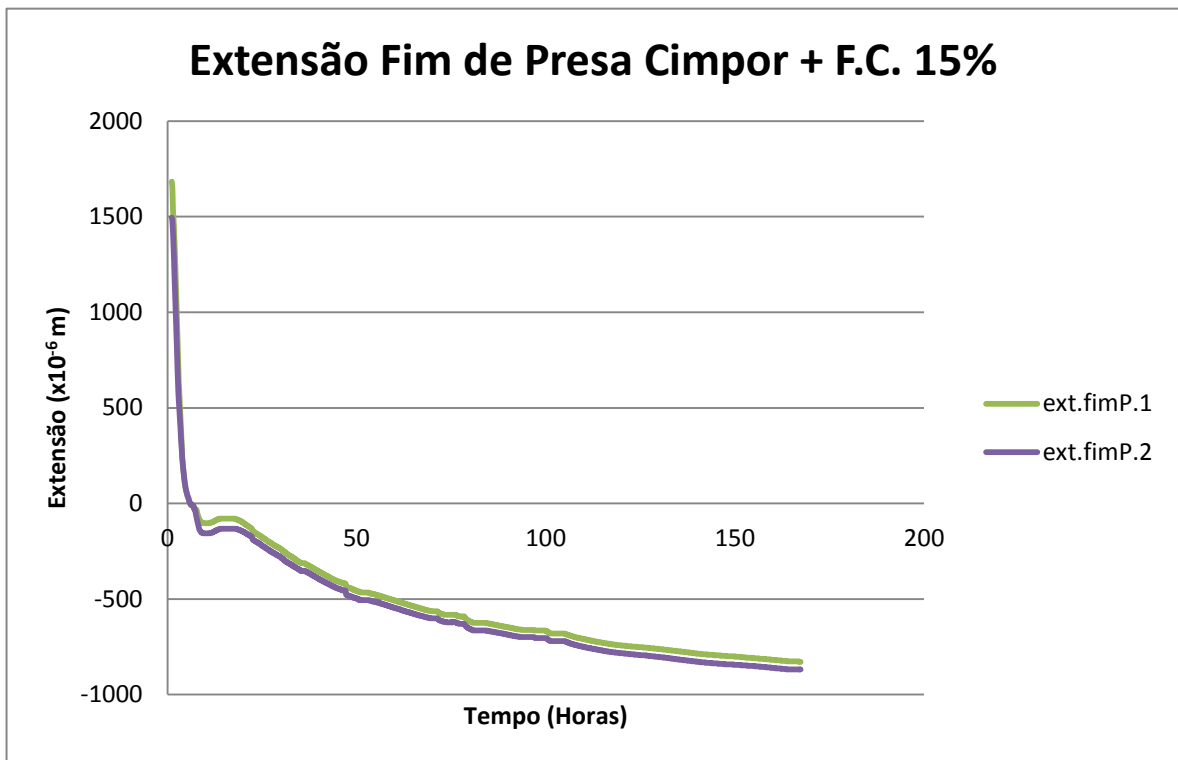
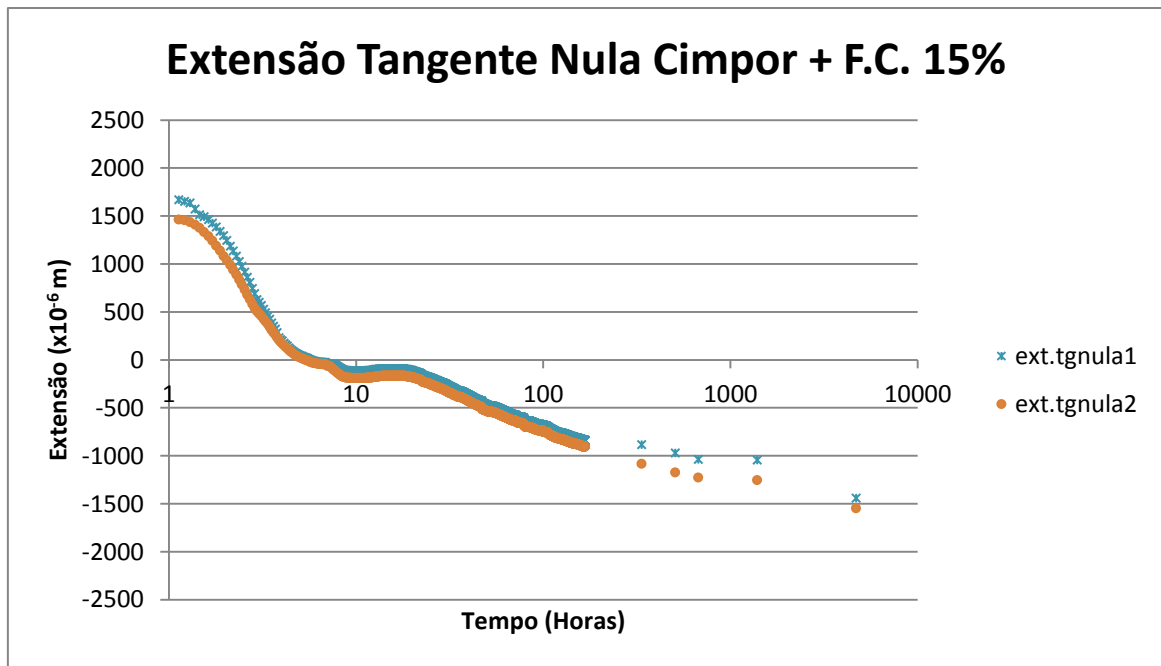


Gráfico 50: Extensão Fim de Presa Cimpor + Filer Calcário 15% (leituras automáticas)





*Gráfico 51: Extensão Tangente Nula Cimpor + Filer Calcário 15%*

A pasta contém uma substituição de 15% do cimento por filer calcário, representando 330 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

O andamento nesta pasta é similar ao das outras pastas já analisadas, sem nenhuma variação a assinalar

### 5.18. Pasta Cimpor + Filér calcário 30%

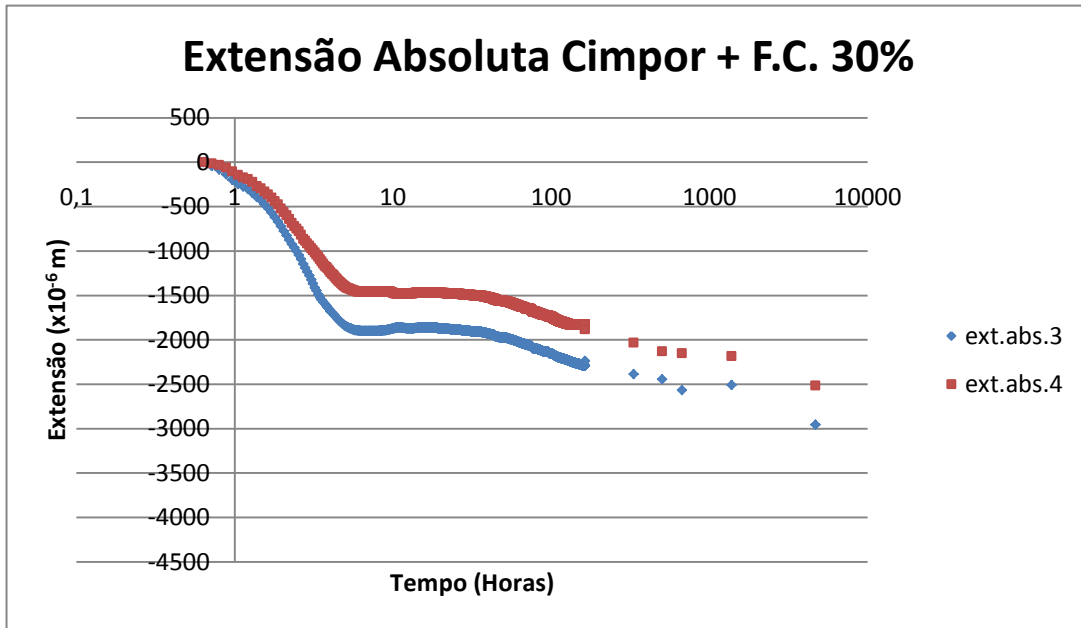


Gráfico 52: Extensão Absoluta Cimpor + Filer Calcário 30%

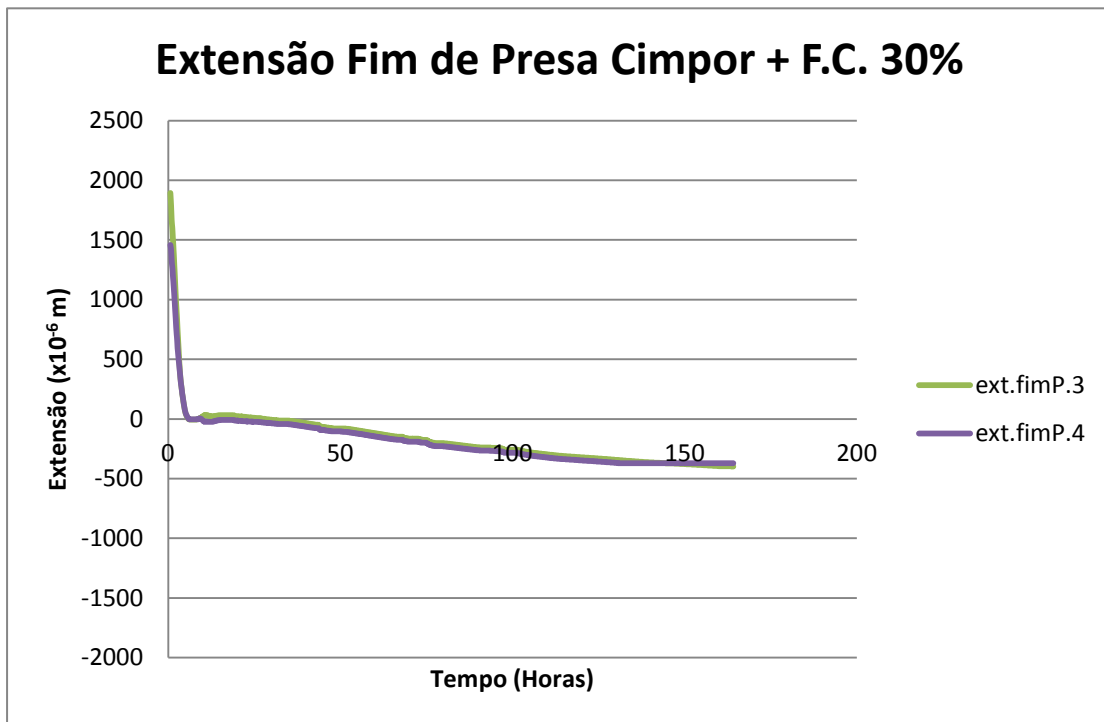
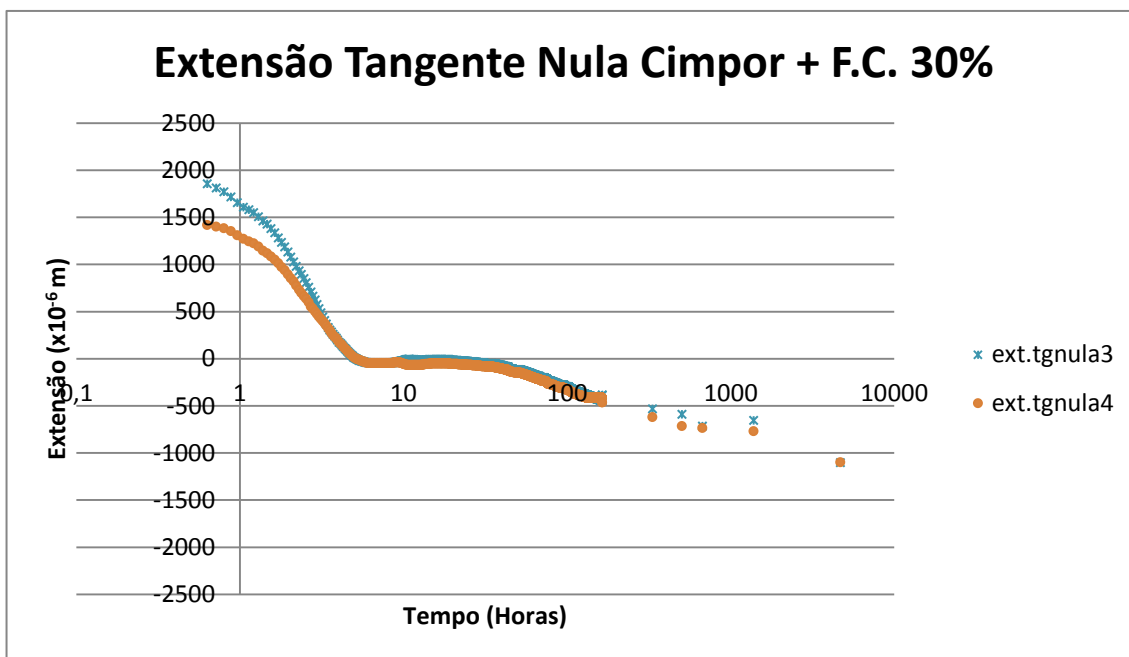


Gráfico 53: Extensão Fim de Presa Cimpor + Filer Calcário 30% (leituras automáticas)



*Gráfico 54: Extensão Tangente Nula Cimpor + Filer Calcário. 30%*

A pasta contém uma substituição de 30% do cimento por filer calcário, representando 660 g de material, colocado de uma forma uniforme juntamente com o cimento.

O andamento nesta pasta é similar ao das outras pastas já analisadas, sem nenhuma variação a assinalar à exceção dos diferentes comportamentos nas últimas medições, que poderão estar associados com a incerteza da metodologia da medição.



## 6. Análise comparativa da retração autogénea

---

Ao longo deste capítulo são apresentados os gráficos comparativos entre as diversas amostras de pastas analisadas.

Inicia-se com uma comparação entre as 2 pastas de referência e continua com as pastas de referência comparadas com as diferentes adições.

Apenas são comparados os gráficos de extensão tangente nula para fazer a análise apenas à fase sólida.

São sempre apresentados 2 tipos de gráficos, a escalas normal e logarítmica, a fim de se conseguir visualizar melhor todo o desenrolar da evolução da retração autogénea nos provetes estudados.

### 6.1. Pasta referência Secil e pasta de referência Cimpor.

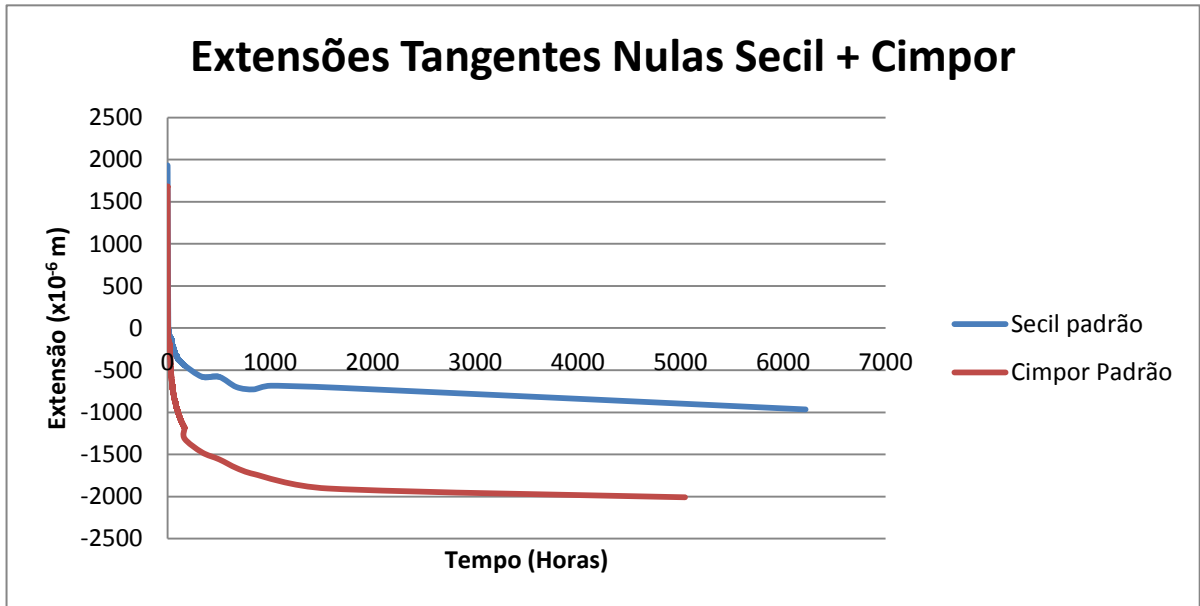


Gráfico 55: Extensões Tangentes Nulas Secil + Cimpor

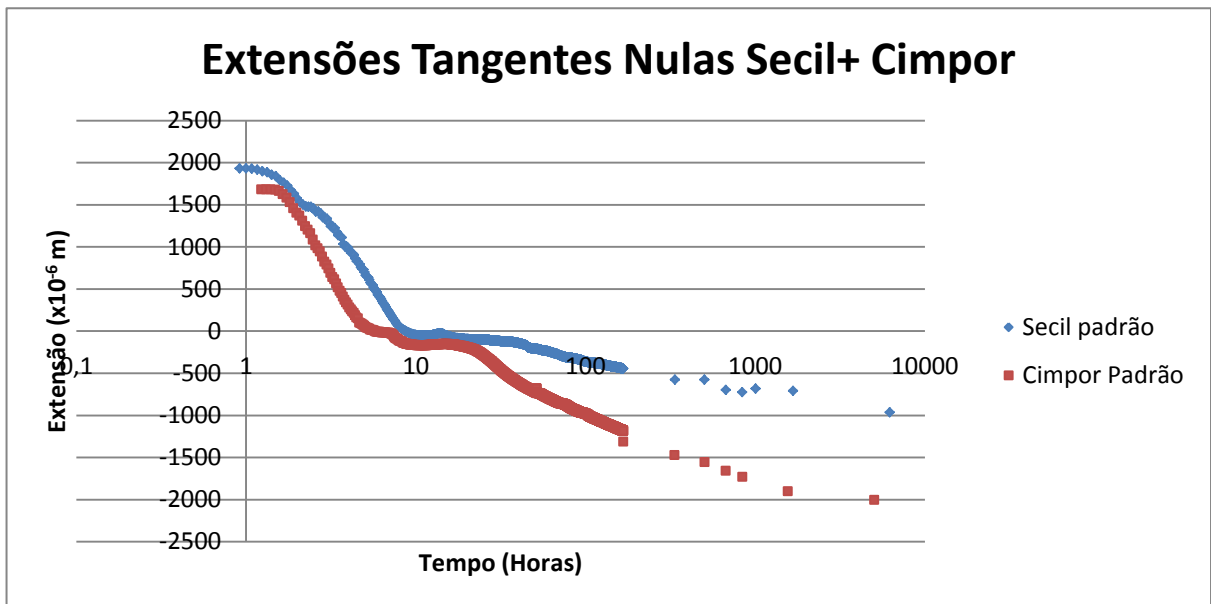


Gráfico 56: Extensões Tangentes Nulas Secil+ Cimpor (escala logarítmica)

Tal como já foi constatado no capítulo 5, o tempo de fim de presa das pastas de referência Secil e Cimpor são diferentes, sendo respectivamente 530 min e 365 min. Ao analisar-se o gráfico 56, vê-se que o comportamento da fase líquida, no cimento Secil se prolonga por mais tempo, estando claramente associado ao superior tempo de presa. No entanto, em termos de valores absolutos os valores de extensão variam significativamente.

Após esta fase o cimento Cimpor padrão tem um comportamento bastante mais marcado no que toca à retracção autogénea, crescendo a um ritmo mais acelerado que o Secil padrão. No fim de 500 horas os 2 valores encontram-se bastante distantes, tendo o cimento Cimpor padrão uma resposta menos eficaz no que toca aos valores de retracção autogénea medidos e apresentados, sendo este comportamento final é bem visível quer no gráfico 55 quer no gráfico 56.

Pode-se considerar-se no estado endurecido, que o comportamento dos 2 cimentos é menos pronunciado.

Segundo [22], "substituindo 20% do cimento Portland por silicato tricálcico puro (C3S) e silicato bicálcico puro (C2S), verificou-se que têm pouca influencia, no entanto o aluminato tricálcico (C3A) muda o curso da deformação" ou seja, o C3A possui bom comportamento face ao fenómeno da retracção autogénea. No entanto, neste trabalho verificou-se que o cimento que possui maior percentagem de C3A é o que tem pior comportamento face ao fenómeno estudado, ou seja o cimento Cimpor, tal como se pode ver nos quadros já apresentados nas características dos cimentos. No estudo realizado pelo LNEC [23], chegou-se exactamente às mesmas conclusões, ou seja, quanto maior o conteúdo em C3A, pior o comportamento face à retracção autogénea.

## 6.2. Pasta referência Secil e diferentes adições e percentagens

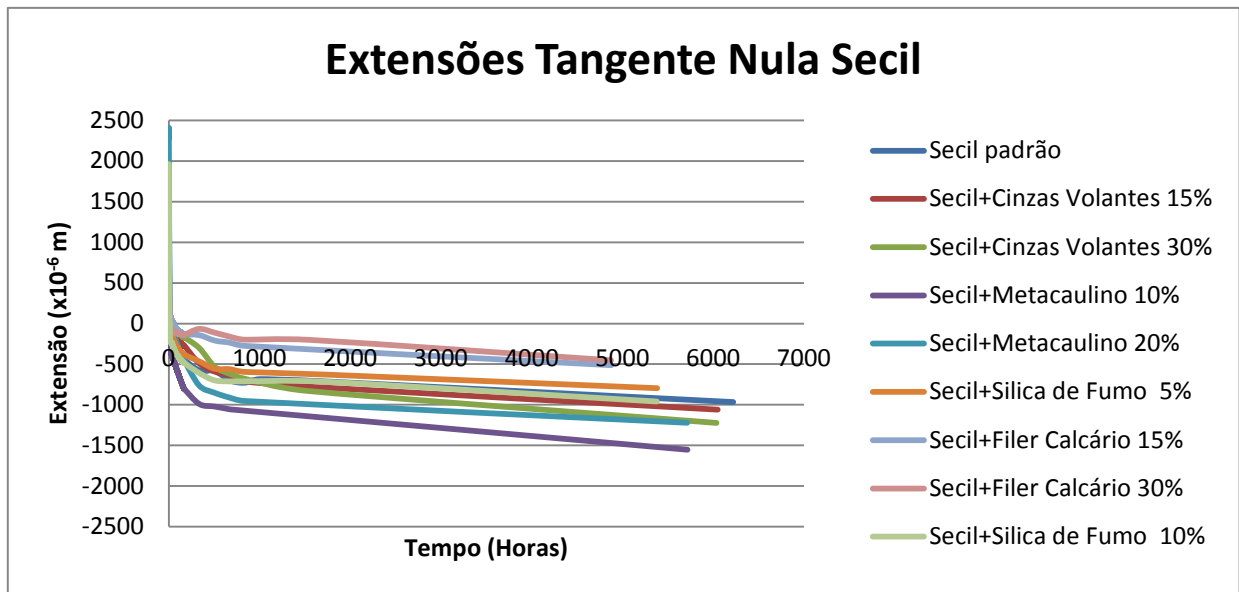


Gráfico 57: Extensões Tangentes Nulas Secil

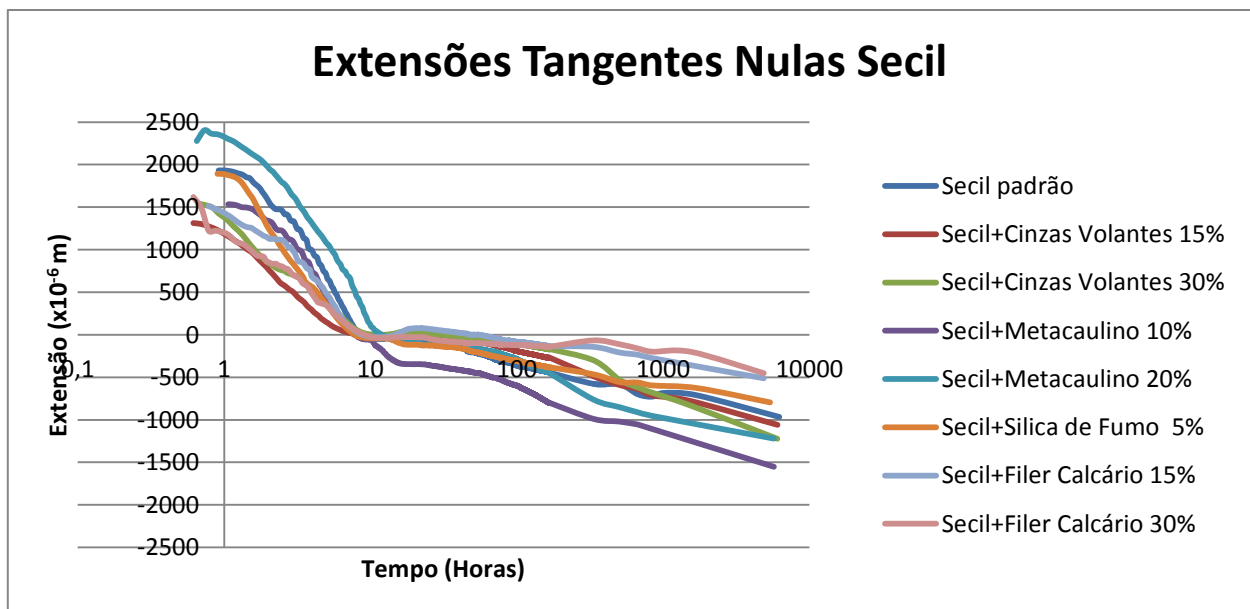


Gráfico 58: Extensões Tangentes Nulas Secil (escala logarítmica)



Nos gráficos 57 e 58 apresentam-se todos os resultados da retração autógena registados no cimento Secil. De seguida estes resultados serão apresentados individualmente, para melhor compreensão do comportamento.

## 6.2.1 Pasta referência Secil + cinzas volantes 15 e 30%

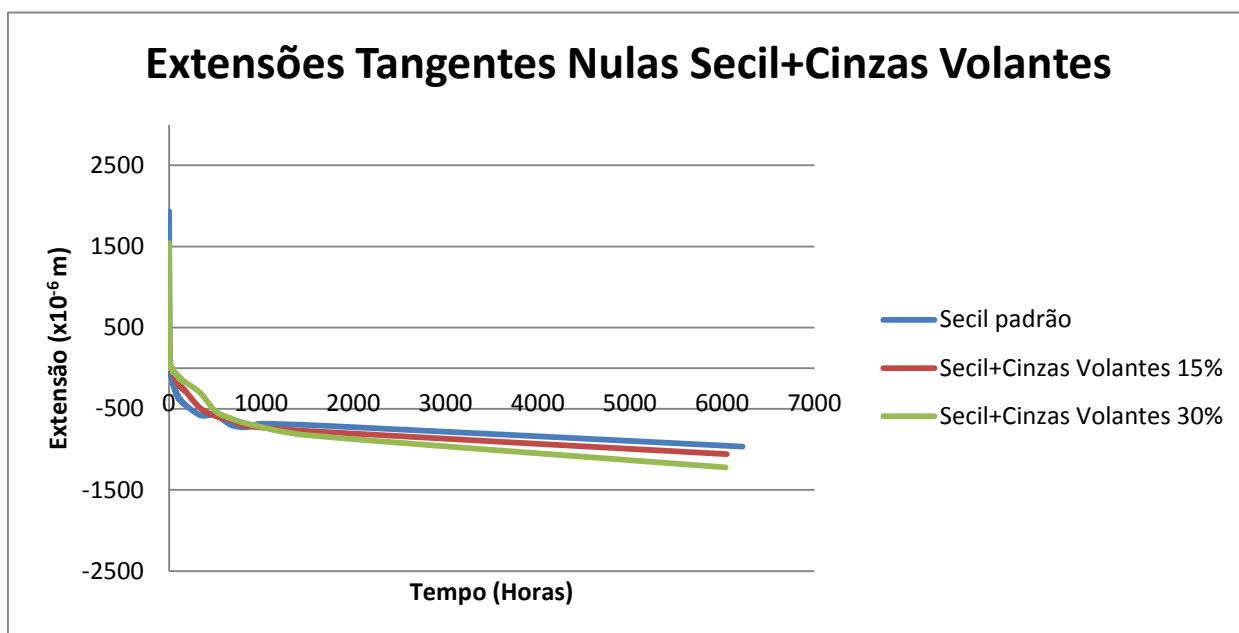


Gráfico 59: Extensões Tangentes Nulas Secil + Cinzas Volantes

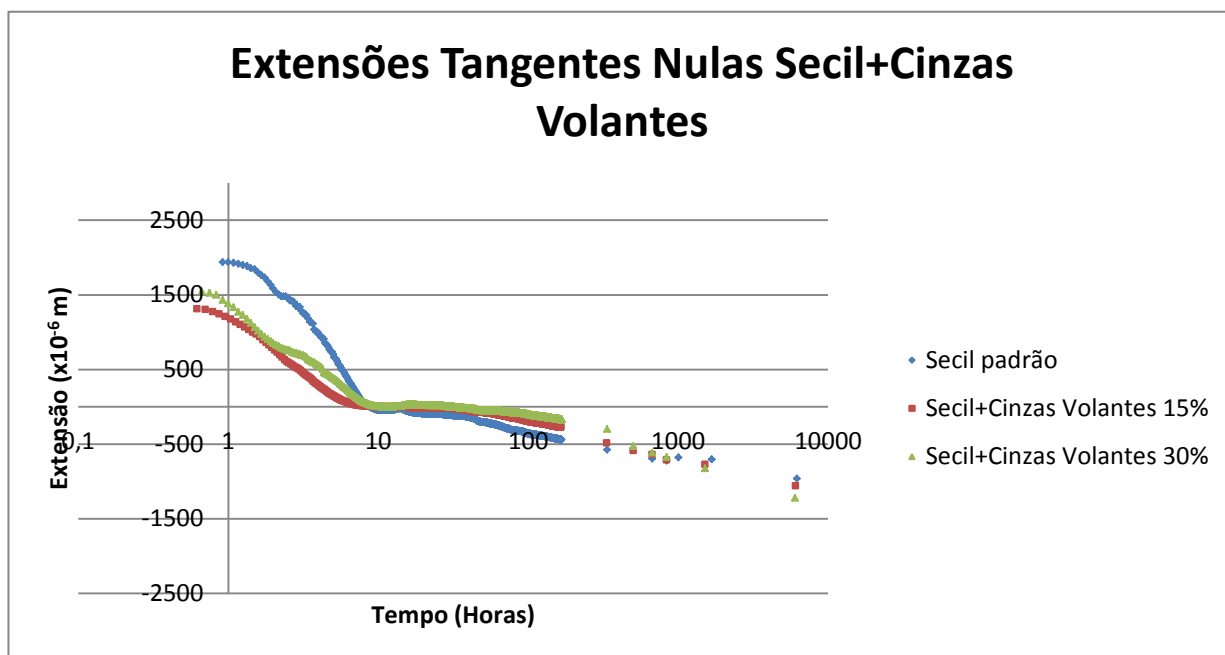


Gráfico 60: Extensões Tangentes Nulas Secil + Cinzas Volantes (escala logarítmica)

Em primeiro lugar note-se que o uso de cinzas volantes na pasta aumenta o seu tempo de presa, fenómeno associado à natureza do material. Este facto está patente ao observar-se a evolução das curvas da retracção autogénea, nomeadamente no primeiro estágio associado à fase líquida.

É interessante verificar que durante as primeiras horas, a retracção diminuiu com o teor em cinzas, por exemplo às 100 horas, a retracção da mistura com o teor de 15% e 30% é respetivamente de -191,01 e -104,54 face aos -362,0 da pasta padrão. No entanto, a longo prazo, o valor da retracção é semelhante nas 3 pastas.

O efeito observado nas primeiras idades é muito importante face à fissuração, dado a que é nesta idade que existe o maior risco de problemas.

Muitos autores referem que quanto maior é a substituição de cimento por cinzas volantes maior é a redução do fenómeno da retracção autogénea. Ora após apresa, esta afirmação é corroborada pelos resultados presentes.

### 6.2.2. Pasta referência Secil + metacaulino 10 e 20%

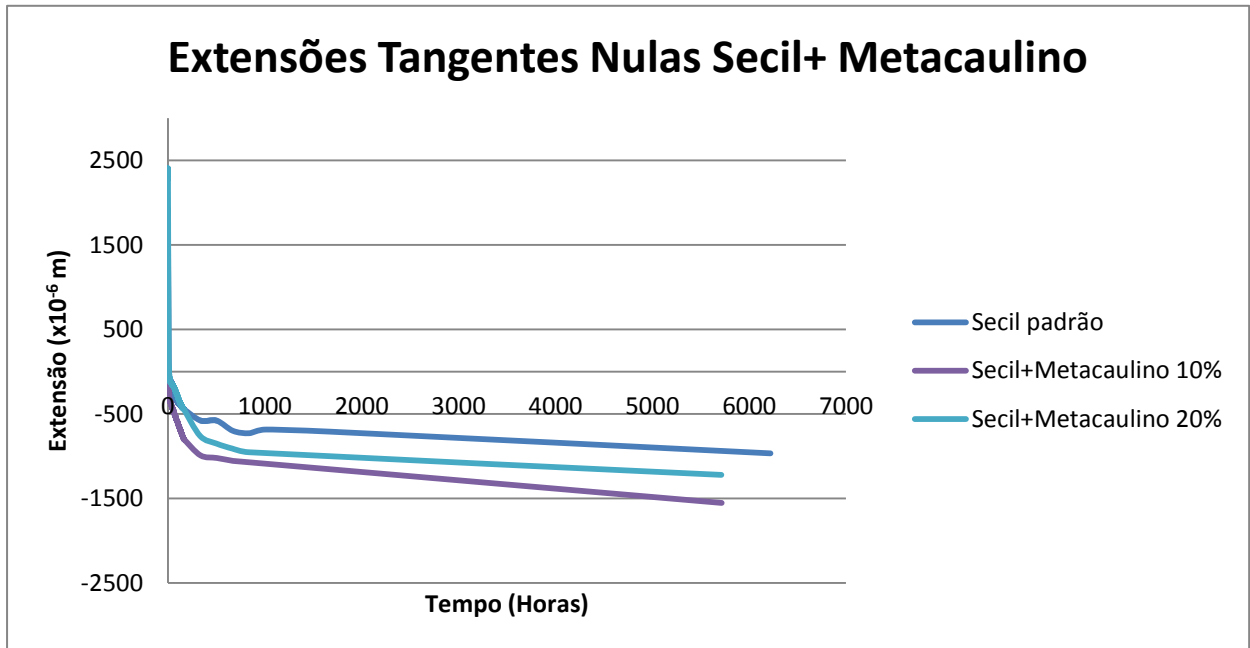


Gráfico 61: Extensões Tangentes Nulas Secil+ Metacaulino

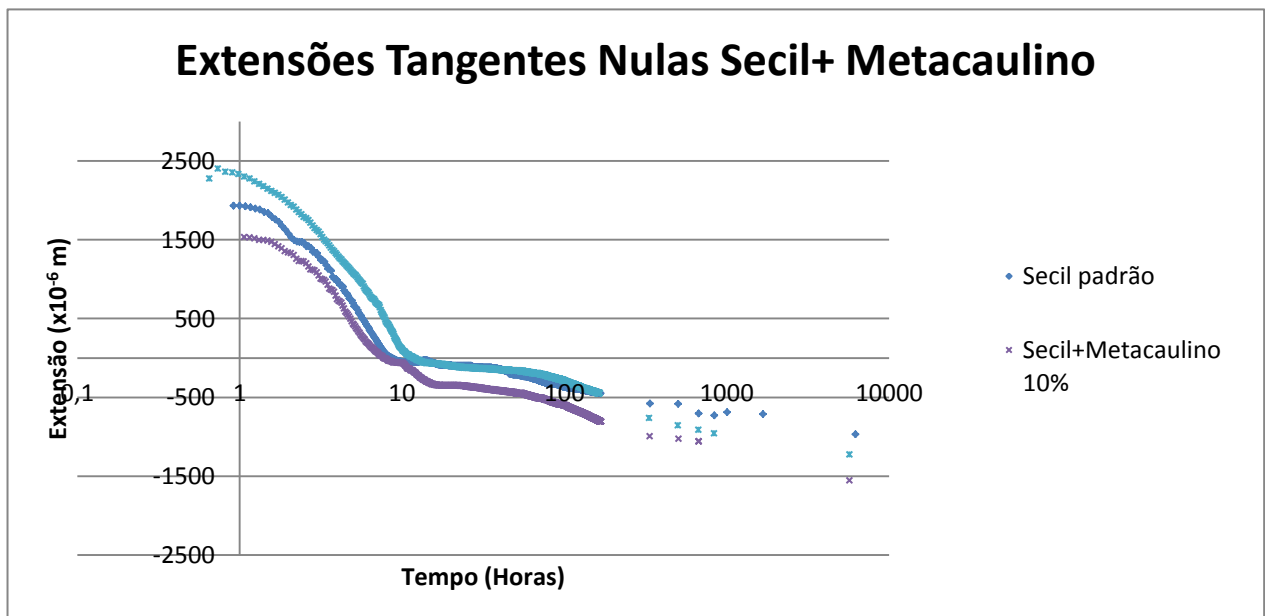


Gráfico 62: Extensões Tangentes Nulas Secil+ Metacaulino (escala logarítmica)

O uso de metacaulino, tal como se verifica em tabela em anexo, faz diminuir gradualmente o tempo de presa, sendo que quanto maior for a adição de metacaulino, menor será o tempo de presa respectivo.

A trabalhabilidade das pastas no estado freco ficou bastante comprometida à medida que se evoluiu na percentagem de substituição, ficando muito consistente e seco no caso da adição de 20% de Metacaulino.

Qualquer uma das tangentes nulas se dá horas depois da presa do cimento, e a longo prazo a retracção das amostras com Metacaulino supera claramente a amostra padrão, o que é coincidente com estudos realizados por exemplo por Brooks et al. [18] após as 24 horas de amostra. Segundo Gleize et al. [17] este efeito do metacaulino, que aumenta o efeito da retracção autogénea pode ser devido ao “incremento da tensão de capilaridade, devido ao refinamento da distribuição porosa...”, e devido à disponibilidade de água na pasta.

De notar o facto de que a dosagem em superplastificante se manteve inalterada face às outras adições, o que no caso do metacaulino foi nocivo face à sua falta de trabalhabilidade, assim, o mesmo autor referido anteriormente, aconselha o aumento efectivo da dosagem de superplastificante aquando do trabalho com este material.

### 6.2.3.Pasta referência Secil + sílica de fumo 5 e 10%

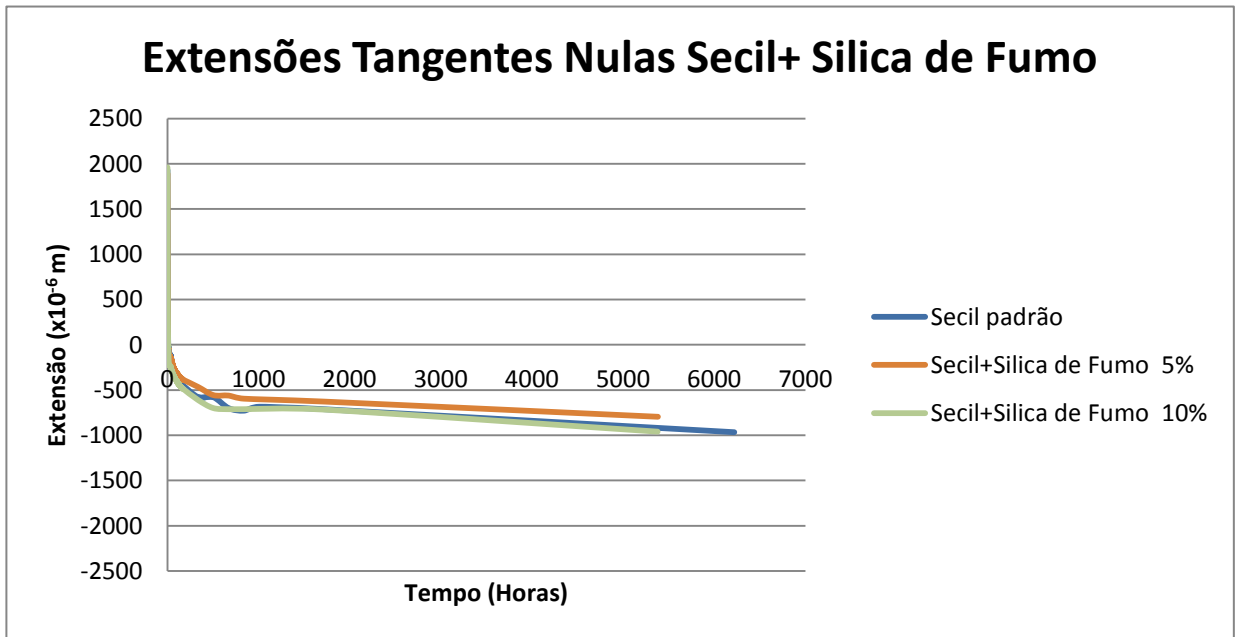


Gráfico 63: Extensões Tangentes Nulas Secil+ Sílica de Fumo

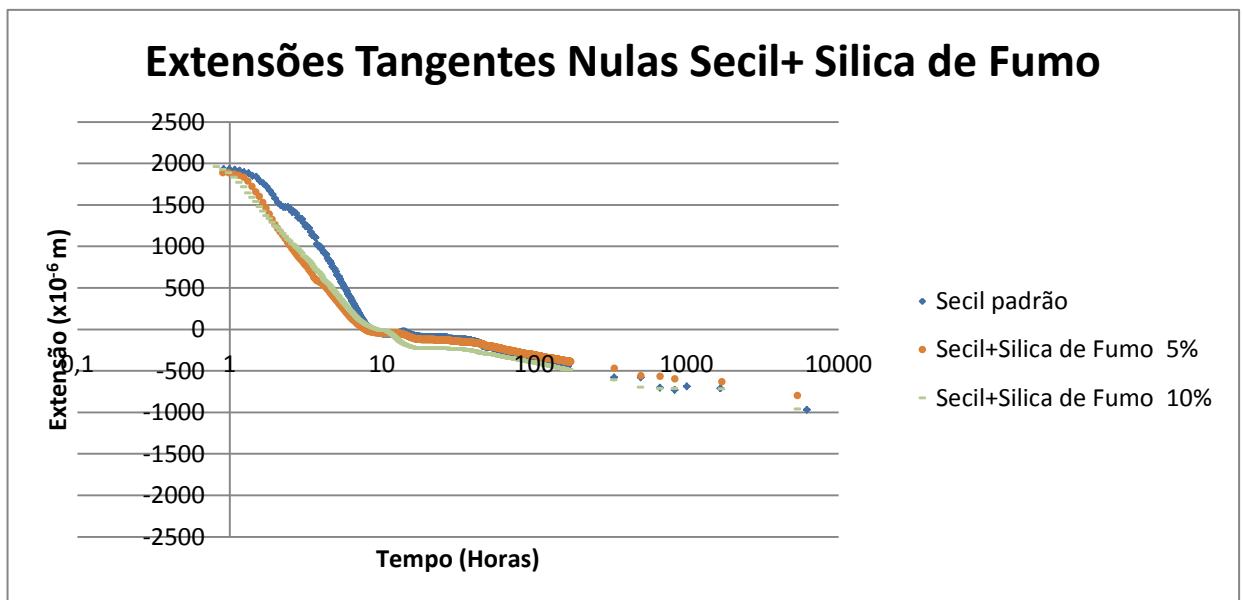


Gráfico 64: Extensões Tangentes Nulas Secil+ Sílica de Fumo (escala logarítmica)

Embora alguns autores [14] defendam que a retracção autogénea aumenta com a introdução de sílica de fumo, nesta abordagem com o cimento Secil isto não se verificou plenamente, tendo existido sempre uma grande proximidade entre as 3 amostras analisadas.

Possivelmente esta facto poderá estar associado à aglomeração das partículas de sílica, o que é suplantado pelos resultados de resistência à compressão que não evidenciam crescimento com o teor de sílica, como era de esperar.

#### 6.2.4.Pasta referência Secil + Filer Calcário 15 e 30%

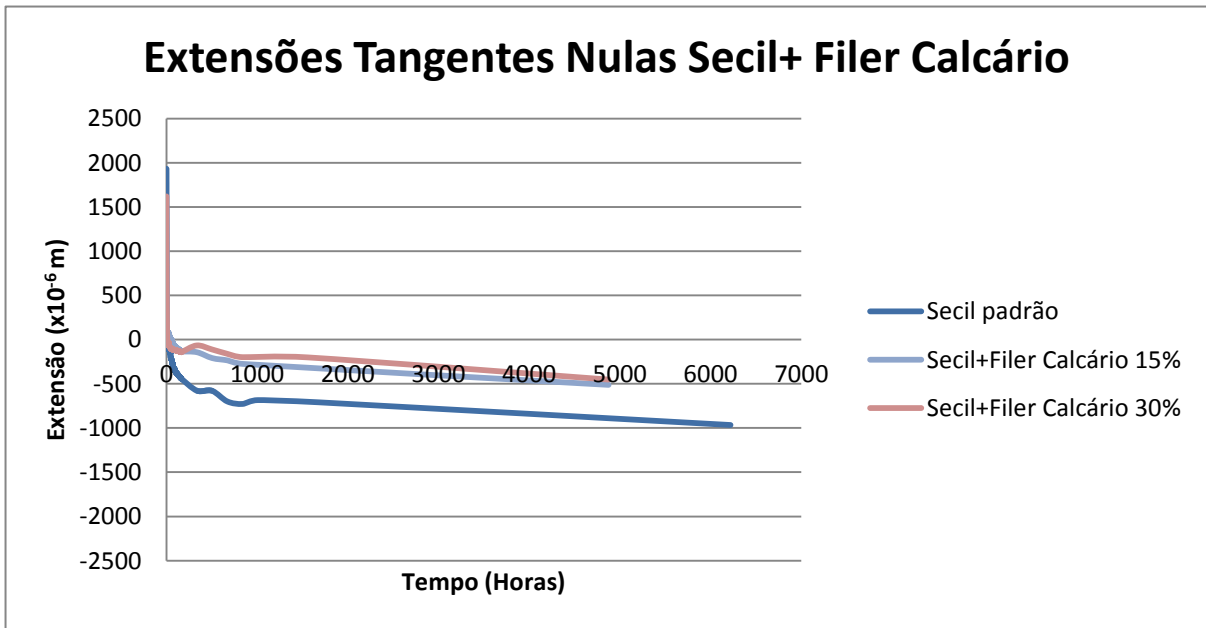


Gráfico 65: Extensões Tangentes Nulas Secil+ Filer Calcário

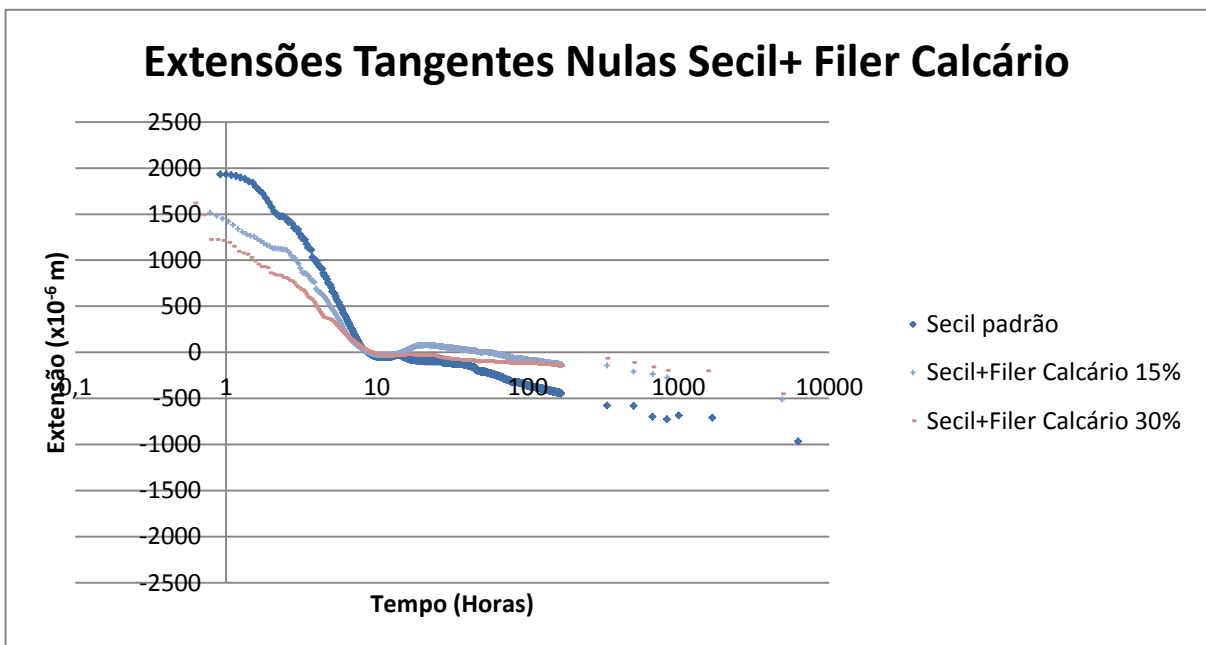


Gráfico 66: Extensões Tangentes Nulas Secil+ Filer Calcário (escala logarítmica)



Tal como se observa, a retracção autogénea apenas na fase fresca é mais acentuada na pasta padrão, ou seja no caso das adições de filer calcário, a retracção autogénea é inteiramente dependente da retracção química associada.

Pode-se então afirmar que o filer calcário apresenta um bom comportamento face à retracção autogénea visto diminuir os seus efeitos face ao cimento Secil padrão. Este bom comportamento está associado à maior razão A/C, como se pode constatar no quadro 1.

Os vários artigos e autores consultados neste tema concordam que o filer aumenta a rapidez do processo de hidratação, ou seja a primeira fase da retracção associada à retracção química é mais célere, salientando todos eles apenas esta primeira fase no que toca á influência deste composto no fenómeno, descartando a sua influência após a presa [21]. No entanto, como observado, para os níveis de substituição utilizados, 15 e 30% a influência da redução do teor de cimento é mais importante que o aumento da velocidade de hidratação associada à presença de filer calcário.

### 6.3. Pasta referência Cimpor e diferentes adições e percentagens

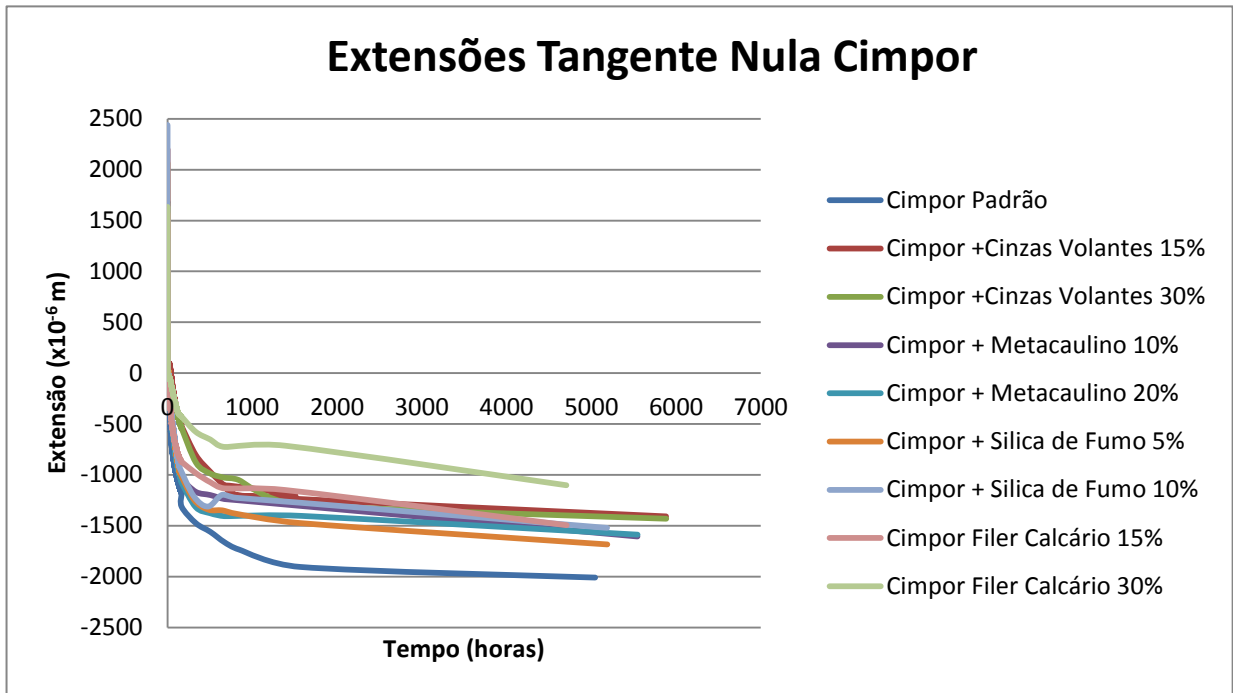


Gráfico 67: Extensões Tangentes Nulas Cimpor

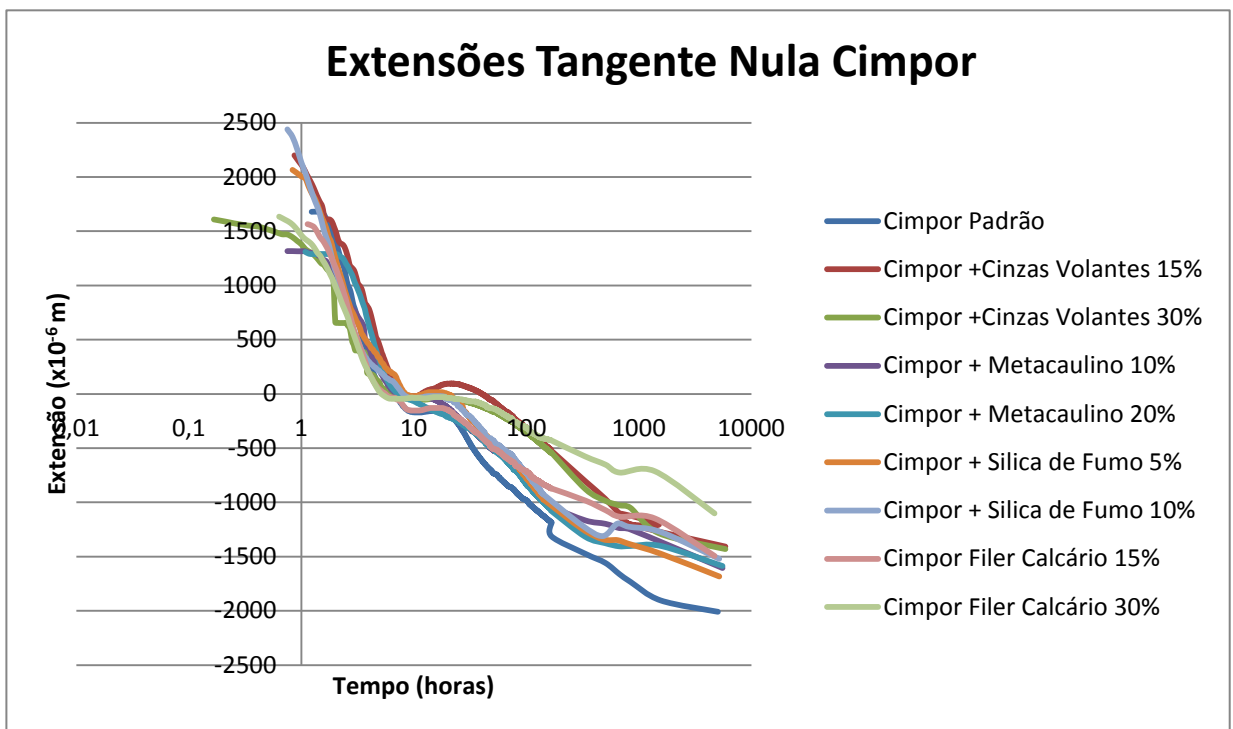


Gráfico 68: Extensões Tangentes Nulas Cimpor (escala logarítmica)

Nos gráficos 67 e 68 apresentam-se todos os resultados da retração autogénea registados no cimento Cimpor. De seguida estes resultados serão apresentados individualmente, para melhor compreensão do comportamento.

### 6.3.1 Pasta referência Cimpor + cinzas volantes 15 e 30%

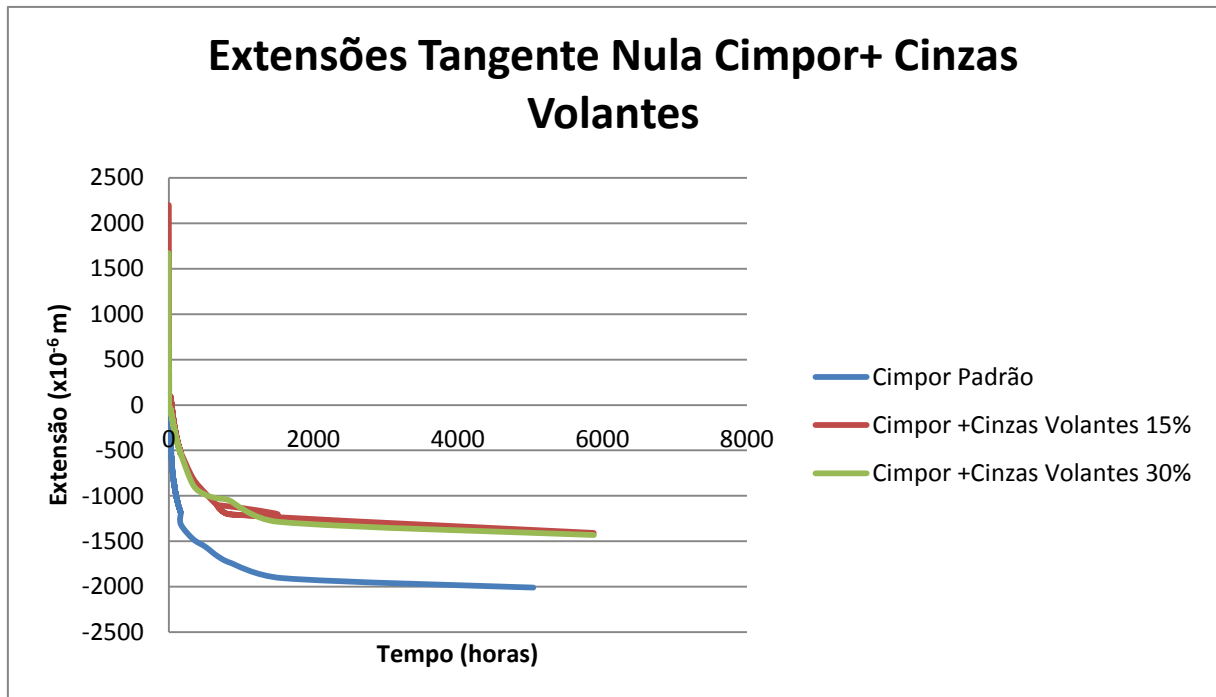


Gráfico 69: Extensões Tangentes Nulas Cimpor+ Cinzas Volantes

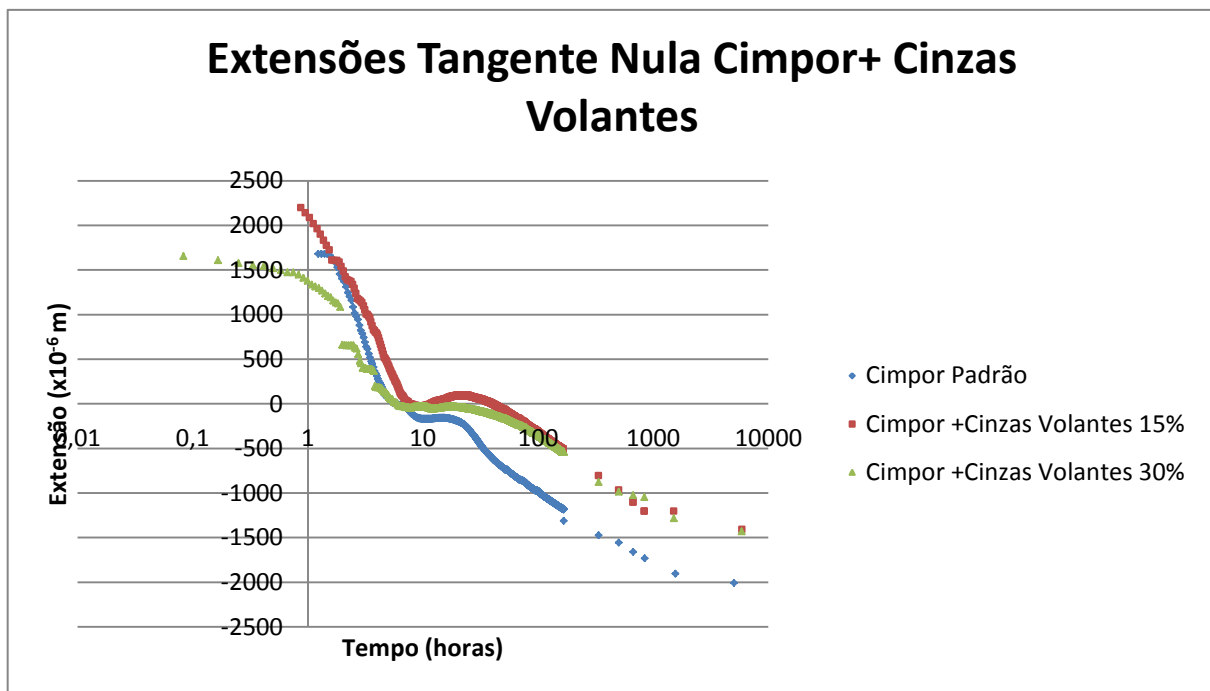


Gráfico 70: Extensões Tangentes Nulas Cimpor+ Cinzas Volantes (escala logarítmica)

Observa-se claramente uma diminuição da retração com um teor em cinzas. Comparando com o efeito das cinzas volantes na pasta do cimento padrão da Secil, verifica-se por um lado, que os valores são superiores mas, por outro, que o efeito das cinzas se mantem a longo prazo.

### 6.3.2 Pasta referência Cimpor + Metacaulino 10 e 20%

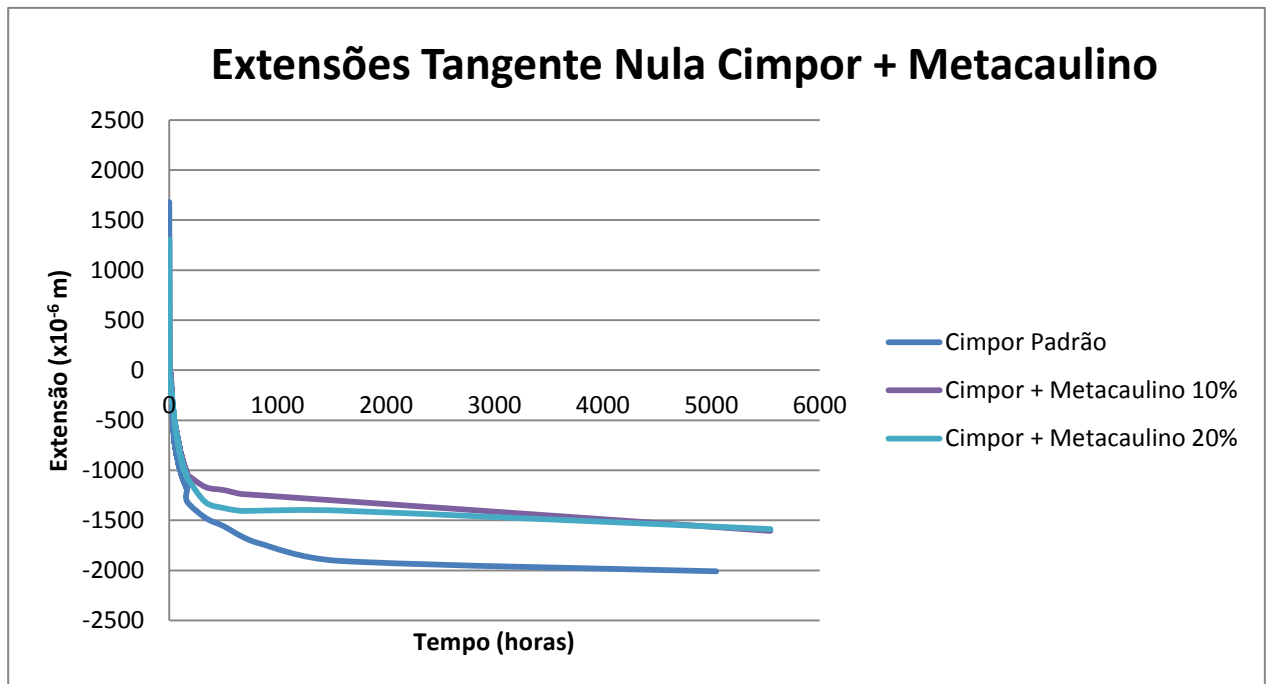


Gráfico 71: Extensões Tangentes Nulas Cimpor + Metacaulino

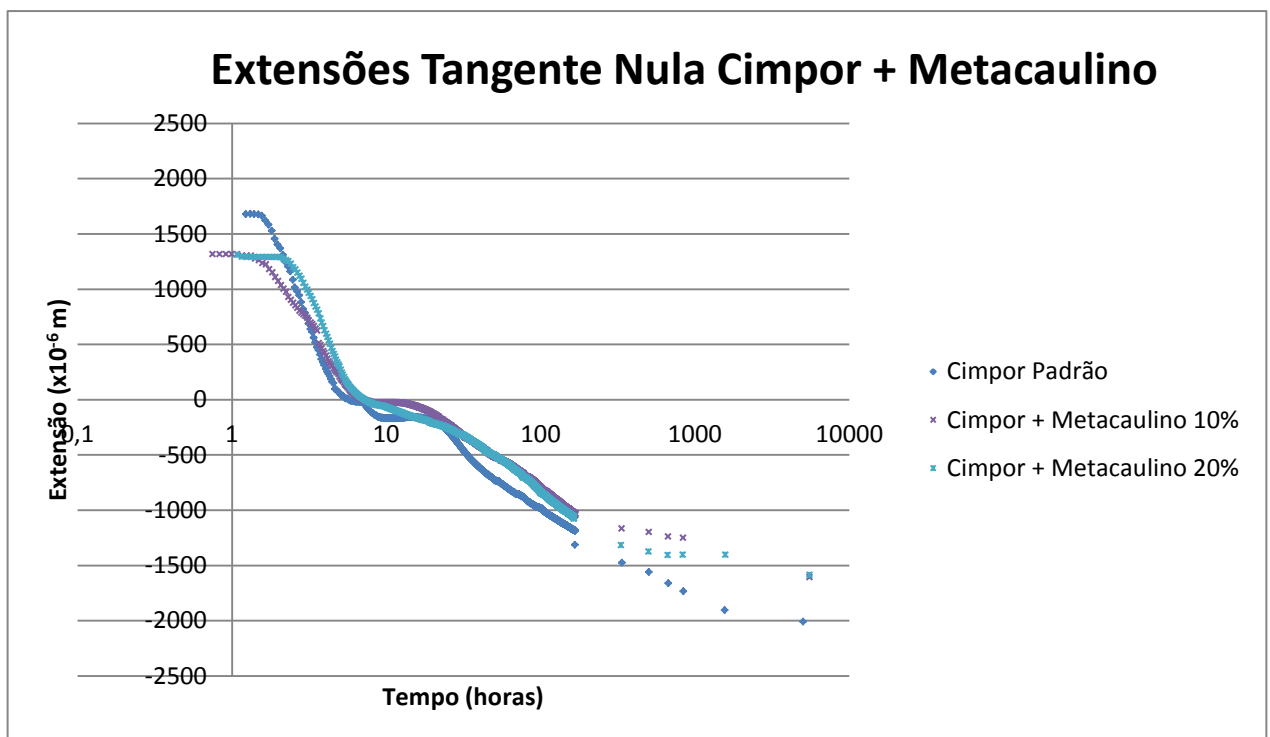


Gráfico 72: Extensões Tangentes Nulas Cimpor + Metacaulino (escala logarítmica)

Desde logo, é claramente visível uma diminuição da retracção autogénea das pastas com adição de metacaulino face ao cimento padrão a longo prazo. Associado a esta observação surge outra, tal como é verificável na tabela dos tempos de presa em anexo, o tempo de presa vai diminuindo à medida que aumenta a percentagem em metacaulino utilizada nas pastas.

A diminuição da retracção autogénea pode ser explicada por um fenómeno designado por Brooks et al [18] por efeito de diluição, tal como é explicado na publicação de Gleize et al [17] “menos cimento significa menos retracção autogénea”.

No entanto, este fenómeno é muito menos marcado do que no caso da adição de cinzas volantes, eventualmente devido à reacção mais rápida do metacaulino, como se pode constatar nos ensaios de determinação de resistência à compressão.

Este efeito díspar do metacaulino nas pastas com cimento Secil e Cimpor pode estar associado à amplitude de retração em cada cimento. Assim, o metacaulino tem um efeito intermédio entre os 2 cimentos, tendo a substituição por metacaulino um efeito agravador no caso do cimento Secil, e um efeito redutor no caso do cimento Cimpor.





### 6.3.3 Pasta referência Cimpor + Silica de Fumo 5 e 10%

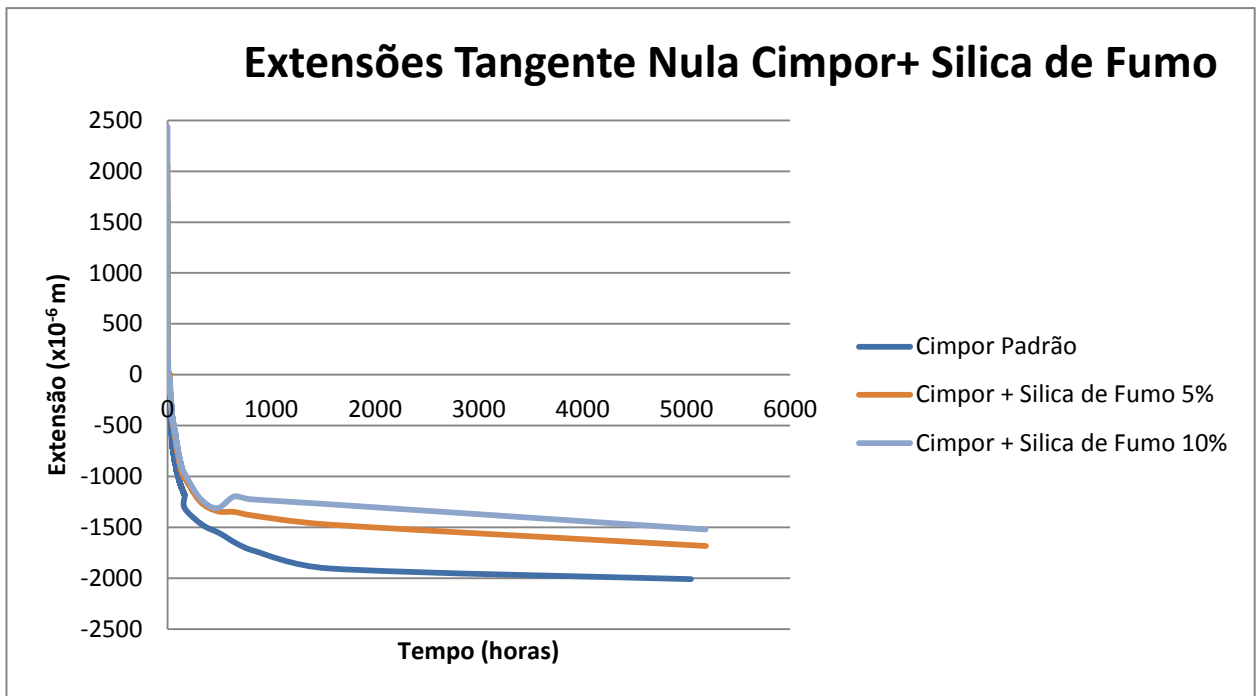


Gráfico 73: Extensões Tangentes Nulas Cimpor+ Sílica de Fumo

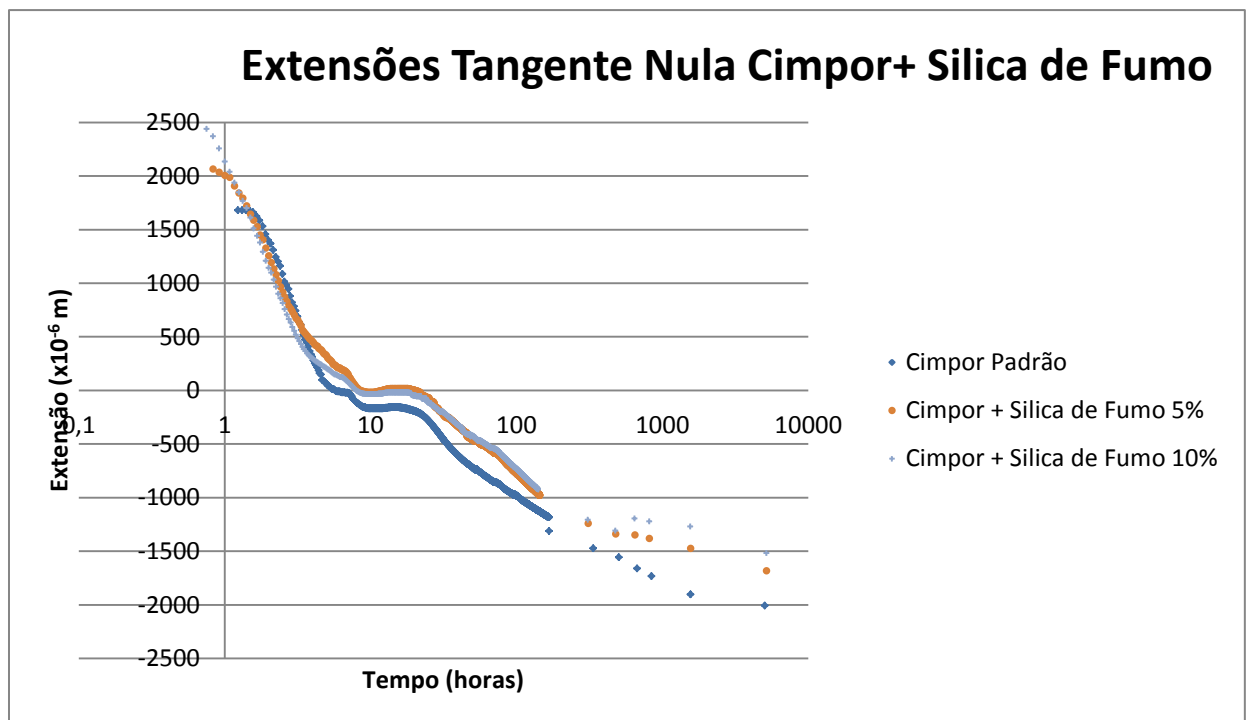


Gráfico 74: Extensão Tangentes Nulas Cimpor + Sílica de Fumo (escala logarítmica)

Os resultados das misturas com sílica de fumo e cimento Cimpor indicam também, tal como o cimento Secil, que a sílica de fumo encontra-se aglomerada, uma vez que não faz aumentar a retração autogénea nem a resistência à compressão, como era de esperar.

### 6.3.4. Pasta referência Cimpor + Filer Calcário 15 e 30%

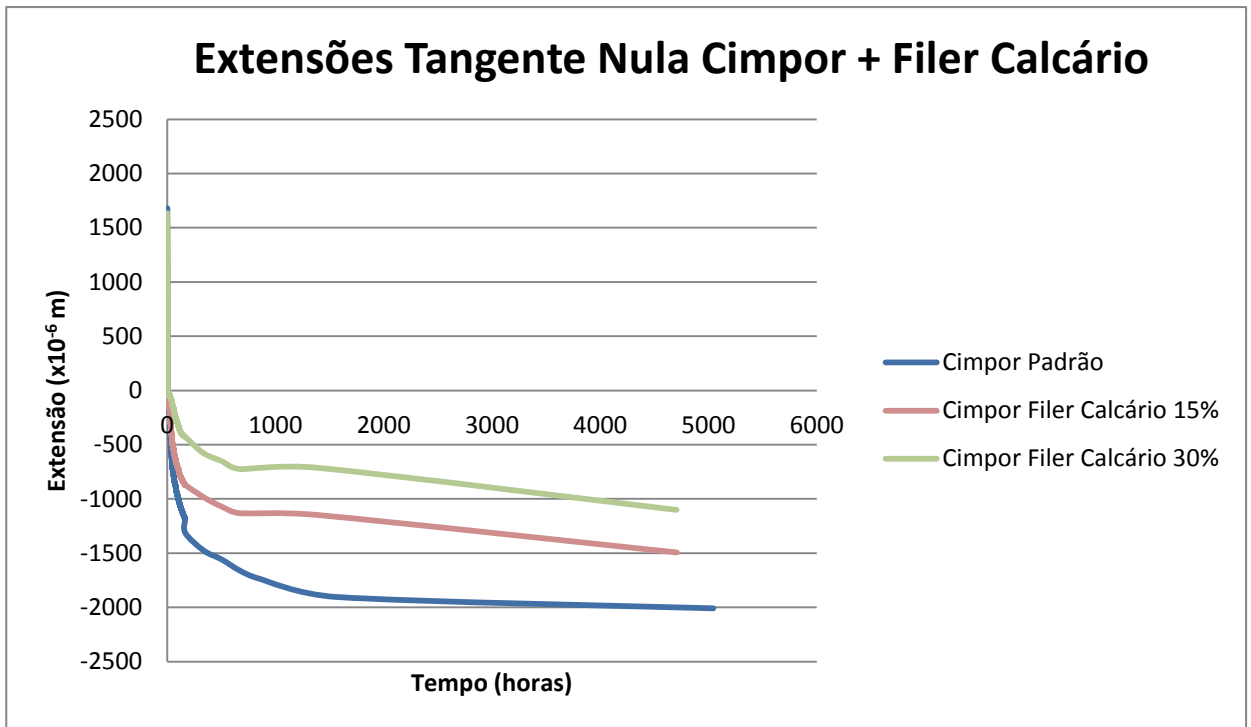


Gráfico 75: Extensões Tangentes Nulas Cimpor + Filer Calcário

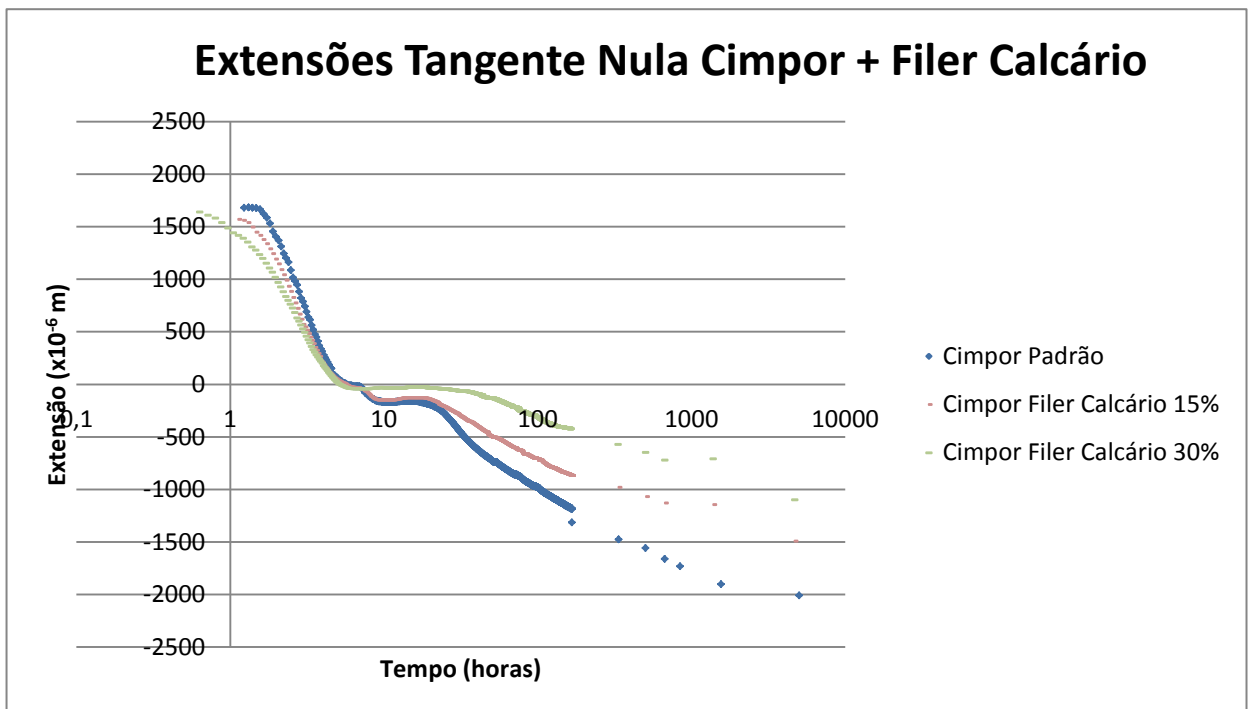


Gráfico 76: Extensões Tangentes Nulas Cimpor + Filer Calcário (escala logarítmica)

Tal como se observa, no caso das adições de filer calcário, a retracção autogénea é inteiramente dependente da retracção química associada.

Pode-se então afirmar que o filer calcário apresenta um bom comportamento face à retracção autogénea visto diminuir os seus efeitos face ao cimento Cimpor padrão tal como já se tinha visto no Secil padrão. Apenas com uma diferença, a escala, ou seja, embora no conjunto seja similar o comportamento, no caso do cimento Cimpor os valores de margem superiores e inferiores possuem uma maior amplitude no que toca à extensão.

Os vários artigos e autores consultados neste tema concordam que o filer aumenta a rapidez do processo de hidratação, ou seja a primeira fase da retracção associada à retracção química é mais célere, salientando todos eles apenas esta primeira fase no que toca á influência deste composto no fenómeno, descartando a sua influência após a presa [21].

Observa-se assim, que o filer também possui um efeito de diluição.

*6.4. Comparação entre as extensões dos cimentos padrão com os cimentos com substituição de Cinzas Volantes, às 24, 100 e 500 horas*

	Cimpor	Secil		
0	-259,37	-97,46	Diferença	Diferença
C.V.15%	-91,78	-14,56	167,59	82,9
C.V.30%	-48,08	-14,55	43,7	0,01

Quadro 11: Diferencial entre as extensões dos cimentos padrão e as extensões com substituição de cimento por cinzas volantes às 24 horas.

	Cimpor	Secil		
0	-981,9	-362,0	Diferença	Diferença
C.V.15%	-317,646	-191,01	664,254	170,99
C.V.30%	-347,41	-104,54	-29,764	86,47

Quadro 12: Diferencial entre as extensões dos cimentos padrão e as extensões com substituição de cimento por cinzas volantes às 100 horas.

	Cimpor	Secil		
0	-1558,87	-579,3	Diferença	Diferença
C.V.15%	-965,635	-589,75	593,235	-10,49
C.V.30%	-985,55	-530,66	-19,915	59,09

Quadro 13: Diferencial entre as extensões dos cimentos padrão e as extensões com substituição de cimento por cinzas volantes às 500 horas.

Nestes quadros é possível de uma forma numérica observar-se o comportamento das pastas já observado nos gráficos apresentados.

A verde encontra-se o melhor comportamento observado face ao padrão e a vermelho encontram-se as pastas que pioraram o comportamento face ao padrão ou face à outra adição, ou seja apresentaram diferenciais negativos.

Na adição de cinzas volantes, pode observar-se que às 24 horas todas as substituições tiveram efeito positivo, sendo que a pasta com a substituição de 30% de cinzas volantes com cimento Cimpor foi a que apresentou melhor resultado face ao fenómeno em estudo, note-se que embora o valor absoluto seja de 43,7, têm de se somar o valor anterior da substituição de 15% de cinzas volantes uma vez que é com esta que é comparado, perfazendo o máximo total absoluto desta amostra às 24 horas.

Às 100 horas dá-se o efeito contrário sendo que a substituição do cimento Cimpor por 30% de cinzas volantes apresenta um acréscimo de retração face à adição de 15 % de 19,915, sendo assim a substituição do cimento Cimpor por 15% de cinzas volantes a que melhor se comporta face ao seu padrão. O cimento Secil apresenta uma evolução positiva, embora em termos absolutos não seja tão grande face ao cimento Cimpor.

Por fim, às 500 horas o comportamento é similar às 100 horas, com a exceção do cimento Secil com substituição de 15% de cinzas volantes que apresenta um mau comportamento face ao padrão.

Assim, o cimento cujo desempenho se revelou mais acentuado face ao fenómeno estudado, com a adição de cinzas volantes, foi o cimento Cimpor, sendo que por um lado, a curto prazo a substituição de cimento por 30% desta adição mostrou melhor comportamento, e por outro, a longo prazo foi a substituição por 15% de cinzas volantes que melhor se comportou.

**6.5. Comparação entre as extensões dos cimentos padrão com os cimentos com substituição de metacaulino, às 24, 100 e 500 horas**

	Cimpor	Secil		
0	-259,37	-97,46	Diferença	Diferença
Met 10%	-202,47	-350,47	56,9	-253,01
Met 20%	-247,924	-119,696	-45,454	230,774

Quadro 14: Diferencial entre as extensões dos cimentos padrão e as extensões com substituição de cimento por metacaulino às 24 horas.

	Cimpor	Secil		
0	-981,9	-362,0	Diferença	Diferença
Met 10%	-792,67	-598,335	189,23	-236,335
Met 20%	-835,251	-285,85	-42,581	312,485

Quadro 15: Diferencial entre as extensões dos cimentos padrão e as extensões com substituição de cimento por metacaulino às 100 horas.

	Cimpor	Secil		
0	-1558,87	-579,3	Diferença	Diferença
Met 10%	-1197,61	-1020,85	361,26	-441,59
Met 20%	-1376,07	-850,35	-178,46	170,5

Quadro 16: Diferencial entre as extensões dos cimentos padrão e as extensões com substituição de cimento por metacaulino às 500 horas.

Nesta adição, pode observar-se às 24 horas que é claramente a substituição do cimento Secil por 20% de metacaulino, a que melhor desempenho possui face ao fenómeno estudado, sendo que 2 das pastas possuem mau comportamento aquando comparadas com os respectivos padrões ou, quando comparadas adições com percentagem menor de substituição.

Às 100 horas o comportamento mantem-se, embora a pasta com substituição de 10% de cimento Cimpor apresente um resultado mais próximo da amostra com substituição de cimentos Secil com 20% da adição, quando comparado com as 24 horas.

Por fim, às 500 horas já é a adição de 10% de metacaulino ao cimento Cimpor, que apresenta o melhor resultado.

Assim, é possível verificar-se nesta adição que claramente apenas a adição de 20% ao cimento Secil e a adição de 10% ao cimento Cimpor apresentam resultados satisfatórios face ao padrão, sendo que a primeira é melhor a curto e médio prazo e a segunda a longo prazo.



*6.6. Comparação entre as extensões dos cimentos padrão com os cimentos com substituição de sílica de fumo, às 24, 100 e 500 horas*

	Cimpor	Secil		
0	-259,37	-97,46	Diferença	Diferença
S.F.5%	-66,165	-124,395	193,205	-26,935
S.F. 10%	-78,23	-225,245	-12,065	-100,85

Quadro 17: Diferencial entre as extensões dos cimentos padrão e as extensões com substituição de cimento por sílica de fumo às 24 horas.

	Cimpor	Secil		
0	-981,9	-362,0	Diferença	Diferença
S.F.5%	-775,47	-304,363	206,43	57,637
S.F. 10%	-731,76	-397,546	43,71	-93,183

Quadro 18: Diferencial entre as extensões dos cimentos padrão e as extensões com substituição de cimento por sílica de fumo às 100 horas.

	Cimpor	Secil		
0	-1558,87	-579,3	Diferença	Diferença
S.F.5%	-1340,52	-555,79	218,35	23,47
S.F. 10%	-1311,04	-698,39	29,48	-142,6

Quadro 19: Diferencial entre as extensões dos cimentos padrão e as extensões com substituição de cimento por sílica de fumo às 500 horas.

Nesta adição, pode observar-se às 24 horas que é claramente a substituição do cimento Cimpopor por 5% de sílica de fumo, a que melhor desempenho possui face ao fenómeno estudado, sendo que as outras 3 pastas possuem mau comportamento aquando comparadas com os respectivos padrões ou, quando comparadas adições com percentagem menor de substituição.

Às 100 horas o comportamento altera-se sendo que apenas uma das pastas mantem o mau comportamento face ao padrão e a pasta que apresenta maior evolução positiva face ao fenómeno de estudo é a que possui uma substituição de 10% do cimento Cimpopor por sílica de fumo.

Por fim, às 500 horas o comportamento mantem-se inalterado comparativamente às 100 horas.

Assim, é possível verificar-se nesta adição que claramente apenas a adição de 5% e 10% de cimento Cimpopor apresentam resultados satisfatórios face ao padrão, sendo que a primeira é melhor a curto prazo e a segunda a longo prazo.

*6.7. Comparação entre as extensões dos cimentos padrão com os cimentos com substituição de filer calcário, às 24, 100 e 500 horas*

	Cimpor	Secil		
0	-259,37	-97,46	Diferença	Diferença
F.C. 15%	-210,41	72,79	48,96	170,25
F.C. 30%	-46,37	-34,49	164,04	-107,28

Quadro 20: Diferencial entre as extensões dos cimentos padrão e as extensões com substituição de cimento por filer calcário às 24 horas.

	Cimpor	Secil		
0	-981,9	-362,0	Diferença	Diferença
F.C. 15%	-709,3	-82,05	272,6	279,95
F.C. 30%	-311,485	-121,98	397,815	-39,93

Quadro 21: Diferencial entre as extensões dos cimentos padrão e as extensões com substituição de cimento por filer calcário às 100 horas.

	Cimpor	Secil		
0	-1558,87	-579,3	Diferença	Diferença
F.C. 15%	-1073,21	-209,08	485,66	370,18
F.C. 30%	-652,08	-137,87	421,13	71,21

Quadro 22: Diferencial entre as extensões dos cimentos padrão e as extensões com substituição de cimento por filer calcário às 500 horas.

Nesta adição, a pasta que apresentou melhor comportamento ao longo de todas as tabelas foi a substituição do cimento Cimpor por 30% de filer calcário. E, embora curto prazo algumas amostras de cimento Secil com a adição apresentem valores negativos, a longo prazo todos diminuem substancialmente a retração.

A nível da comparação entre adições, às 24 horas, em termos absolutos a que apresentou melhor comportamento face às outras foi a substituição de 20% de cimento Secil por metacaulino, já as 100 e 500 horas foi a substituição de 30% de cimento Cimpor por filer calcário.

Todos os valores medidos resultaram das médias das 2 pastas analisadas em cada tipo de amostra.

## 7.Comparação com a retração química

---

Ao longo deste capítulo serão apresentadas os quadros em que se compara a retração química com a retração autógena. A comparação é feita em função dos tempos de presa e da extensão tangente nula, para isso foram usados quer os dados do quadro A.1. do anexo quer a média da extensão tangente nula dos provetes estudados. Os valores referentes à retração química e retração autógena são adquiridos no tratamento dos resultados laboratoriais. Por fim fez-se a relação entre as 2 retrações usando a retração química como denominador e retração autógena como numerador.

### 7.1. Secil Padrão

Secil Padrão		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	443	0,0062	-0,00122	0,193
Fim de presa (min)	530	0,0068	-0,00131	0,194
Tangente Nula (min)	520	0,0068	-0,00133	0,195

Quadro 23: Relação entre retração química e autogénea: Secil Padrão

### 7.2. Secil + Cinzas Volantes 15%

Secil + Cinzas Volantes 15%		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	510	0,0040	-0,00099	0,249
Fim de presa (min)	628	0,0050	-0,00098	0,197
Tangente Nula (min)	522	0,0045	-0,00099	0,222

Quadro 24: Relação entre retração química e autogénea: Secil + Cinzas Volantes 15%

### 7.3. Secil + Cinzas Volantes 30%

Secil + Cinzas Volantes 30%		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	565	0,0030	-0,00073	0,242
Fim de presa (min)	655	0,0040	-0,00075	0,197
Tangente Nula (min)	576	0,0030	-0,00073	0,222

Quadro 25: Relação entre retração química e autogénea: Secil + Cinzas Volantes 30%

#### 7.4. Secil + Metacaulino 10%

<b>Secil + Metacaulino 10%</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	364	0,0010	-0,00090	0,905
Fim de presa (min)	460	0,0015	-0,00099	0,664
Tangente Nula (min)	472	0,0015	-0,00100	0,668

Quadro 26: Relação entre retração química e autogénea: Secil + metacaulino 10%

#### 7.5. Secil + Metacaulino 20%

<b>Secil + Metacaulino 20%</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	264	0,0015	-0,00075	0,499
Fim de presa (min)	359	0,0020	-0,00109	0,544
Tangente Nula (min)	710	0,0050	-0,00127	0,254

Quadro 27: Relação entre retração química e autogénea: Secil + metacaulino 20%

#### 7.6. Secil + Sílica de Fumo 5%

<b>Secil + Sílica de Fumo 5%</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	408	0,015	-0,00087	0,058
Fim de presa (min)	519	0,020	-0,00101	0,051
Tangente Nula (min)	469	0,018	-0,00097	0,055

Quadro 28: Relação entre retração química e autogénea: Secil + sílica de fumo 5%

### 7.7. Secil + Sílica de Fumo 10%

<b>Secil + Sílica de Fumo 10%</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	375	0,015	-0,00082	0,055
Fim de presa (min)	477	0,023	-0,00092	0,039
Tangente Nula (min)	566	0,035	-0,00095	0,027

Quadro 29: Relação entre retração química e autogénea: Secil + sílica de fumo 10%

### 7.8. Secil + Filer Calcário 15%

<b>Secil + Filer Calcário 15%</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	495	0,0010	-0,00119	0,119
Fim de presa (min)	615	0,0012	-0,00123	0,102
Tangente Nula (min)	527	0,0010	-0,00122	0,122

Quadro 30: Relação entre retração química e autogénea: Secil + filer calcário 15%

### 7.9. Secil + Filer Calcário 30%

<b>Secil + Filer Calcário 30%</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	460	0,0030	-0,00082	0,329
Fim de presa (min)	585	0,0040	-0,00092	0,289
Tangente Nula (min)	545	0,0040	-0,00090	0,256

Quadro 31: Relação entre retração química e autogénea: Secil + filer calcário 30%



### 7.10. Cimpor Padrão

<b>Cimpor Padrão</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	253	0,0025	-0,00049	0,197
Fim de presa (min)	365	0,0060	-0,00086	0,143
Tangente Nula (min)	347	0,0050	-0,00081	0,162

Quadro 32: Relação entre retração química e autogénea: Cimpor Padrão

### 7.11. Cimpor + Cinzas Volantes 15%

<b>Cimpor+ Cinzas Volantes 15%</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	359	0,0030	-0,00130	0,434
Fim de presa (min)	480	0,0060	-0,00149	0,271
Tangente Nula (min)	459	0,0050	-0,00149	0,297

Quadro 33: Relação entre retração química e autogénea: Cimpor + cinzas volantes 15%

### 7.12. Cimpor + Cinzas Volantes 30%

<b>Cimpor + Cinzas Volantes 30%</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	306	0,0010	-0,00121	0,32
Fim de presa (min)	470	0,0030	-0,00133	0,43
Tangente Nula (min)	350	0,0020	-0,00127	0,34

Quadro 34: Relação entre retração química e autogénea: Cimpor + cinzas volantes 30%

### 7.13. Cimpor + Metacaulino 10%

<b>Cimpor + Metacaulino 10%</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	203	0,0030	-0,00048	0,160
Fim de presa (min)	251	0,0040	-0,00072	0,205
Tangente Nula (min)	427	0,0070	-0,00101	0,156

Quadro 35: Relação entre retração química e autogénea: Cimpor + metacaulino 10%

### 7.14. Cimpor + Metacaulino 20%

<b>Cimpor + Metacaulino 20%</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	148	0,0050	-0,00008	0,162
Fim de presa (min)	207	0,0075	-0,00038	0,505
Tangente Nula (min)	435	0,0055	-0,00112	0,214

Quadro 36: Relação entre retração química e autogénea: Cimpor + metacaulino 20%

### 7.15. Cimpor + Sílica de Fumo 5%

Devido a uma anomalia no processo laboratorial, os resultados da retração química desta amostra ficaram comprometidos, logo a relação também ficou subsequentemente comprometida

### 7.16. Cimpor + Sílica de Fumo 10%

<b>Cimpor + Sílica de Fumo 10%</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	230	0,0070	-0,00104	0,149
Fim de presa (min)	315	0,0100	-0,00115	0,115
Tangente Nula (min)	481	0,0180	-0,00130	0,072

Quadro 38: Relação entre retração química e autogénea: Cimpor + sílica de fumo 10%

### 7.17. Cimpor + Filer Calcário 15%

<b>Cimpor + Filer Calcário 15%</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	275	0,0030	-0,00116	0,386
Fim de presa (min)	425	0,0070	-0,00128	0,183
Tangente Nula (min)	333	0,0060	-0,00123	0,215

Quadro 39: Relação entre retração química e autogénea: Cimpor + filer calcário 15%

### 7.18. Cimpor + Filer Calcário 30%

<b>Cimpor + Filer Calcário 30%</b>		Retração Química (ml/g)	Retração Autogénea (ml/g)	Relação R.A./R.Q.
Início de presa (min)	295	0,060	-0,00131	0,219
Fim de presa (min)	425	0,013	-0,00139	0,107
Tangente Nula (min)	308	0,011	-0,00134	0,223

Quadro 40: Relação entre retração química e autogénea: Cimpor + filer calcário 30%

Ao longo deste capítulo processou-se a comparação entre a retração química e a retração autogénea, tendo como referência 3 momentos dos ensaios: Início de presa, fim de presa e tangente nula. Tendo em conta os valores medidos nos 2 tipos de ensaios face a estes 3 momentos, procedeu-se à relação entre os 2, sendo a retração autogénea o numerador e a retração química o denominador. Tendo em conta que são 2 ensaios distintos com procedimentos e tempos de leitura distintos, obviamente os valores serão distintos, focando-se então no único factor analisável objectivamente: A sua relação. Ora tendo em conta as relações apresentadas, pode-se verificar que variaram pouco entre os 3 momentos analisados em todas as amostras, com excepção da amostra Cimpor com sílica de fumo no teor de 5%. Estas discrepâncias podem ser deduzidas por erros de leitura no ensaio de retração química ou erros de elaboração do mesmo, uma vez que as leituras são a olho nu e o ensaio pode ter algumas margens de erro ao longo da sua elaboração. Todas as outras amostras apresentam variações de amplitude bastante similares, o que demonstra que a relação entre um e outro ensaio se mantém ao longo do tempo, existindo a sua correlação no que toca a estes 2 fenómenos.

## 8. Conclusões

---

Tendo em conta o objectivo desta dissertação, pode-se afirmar que foi cumprido uma vez que foi comprovada a eficiência das 4 adições face ao fenómeno da retração autogénea com excepção da sílica de fumo, por a mesma não se encontrar em condições óptimas de análise.

Verificou-se também a relação existente, no estado fresco, entre a retração química e autogénea, isto através das relações que puderam ser retiradas dos respetivos resultados dos ensaios.

Tal como já foi dito, os ensaios com substituição de sílica de fumo foram inconclusivos face à qualidade do material que se utilizou.

As cinzas volantes diminuem a retração a curto prazo sendo que a longo prazo esta redução é menos acentuada, isto porque, por um lado, a curto prazo, as cinzas reagem pouco e a razão A/C aumenta, sendo a retração menos, por outro lado, a longo prazo, com a reacção das cinzas, aumenta o refinamento da estrutura porosa, aumentando assim a retração.

O metacaulino ao ter uma reacção mais rápida não possui uma resposta tão boa quando comparado por exemplo com as cinzas volantes, sendo que no caso da substituição por cimento Cimpor, mostrou poder ser eficaz.

O filer calcário tem um efeito diluidor, diminuindo a relação A/C e portanto aumentando também a retração autogénea em ambos os cimentos analisados.

Finalmente, verificou-se que este ensaio realizado permite diferenciar claramente o comportamento das pastas na sua respectiva fase fresca ou sólida.



## 9. Sugestões para desenvolvimentos futuros

---

O interesse da comunidade científica internacional sobre a retração autogénea, é crescente ao longo dos últimos anos, deverá reflectir-se num consenso internacional relativo à nomenclatura referente ao tema, esta uniformização, levará a que termos redundantes e com poucas semelhanças sejam uniformizados, contribuindo assim para a melhor compreensão deste tema.

Outro aspecto que necessita uma gradual uniformização, é o método de medição utilizado nas leituras deste fenómeno, métodos que variam bastante em todo o mundo, é fundamental uma normalização e uniformização a nível internacional dos métodos de medição e respectivas condições, nomeadamente no instante em que se pode considerar que o comportamento é assumido como sólido.

As dependências dos objectos de estudo do meio envolvente são também um factor que têm vindo a ser posto em evidência ao longo dos anos, sendo de maior importância a fixação de um método experimental.

Por fim, há que avaliar a longo prazo as soluções utilizadas para mitigar este fenómeno e até que ponto podem alterar outras características das pastas.

É também importante melhorar a legislação sobre este ramo de estudo.

Em termos de estudos futuros, propõe-se o alargamento do tipo de materiais utilizados, a avaliação da sílica de fumo não aglomerada, e a utilização de diferentes razões A/C.

Finalmente, a avaliação de modelos que relacionam a retração de pastas com a retração de pastas e betões permitirá conhecer melhor a influencia dos agregados neste tipo de retração, para diferentes ligantes.





# 10. Bibliografia

---

## **Autores:**

[1]: E- Tazawa (Ed.), "proceedings of the international workshop on Autogenous shrinkage of concrete", JCI, Hiroshima, Japan 1998.

[2]: Davis H.E; "Autogenous volume changes of concrete", 43<sup>rd</sup> A.S.T.M. Annual meeting, Atlantic City, 1940, volume 44 pages 1103-1110.

[3]: Collepardi M.; "Science and technology of concrete", Ulrico Hoepli, Milano 1980

[4]: Baroghel-Bouny V. et al; "Shrinkage of concrete, shrinkage 2000", Proceedings of the international RILEM workshop, 2000

[5]: Holt E.; "Early autogenous shrinkage of concrete", Technical Research Centre of Finland, 2001

[6]: Boivin.S. Et al; "Experimental assessment of chemical shrinkage of hydrating cement pastes", in Proceedings of the international workshop on Autogenous shrinkage of concrete, JCI, Hiroshima, Japan 1998.

[7]: Powers & Brownyard, T.L., "Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste", Bullentin 22, Portland Cement Association, Chicago, 1948

[8]: Taylor, H.F.W., Cement Chemistry, 2<sup>nd</sup> Edition, Thomas Telford, New York, 1997

[9]: Acker, P., "Comportement meécanique du béton: apports de l'approche physico-quinique" *Rapport de Reserche LPC*, 1988.

[10]: Kronlöf, A., Personal slides, Betoniyhdistys, 1999

[11]: Mehta, P.K and Monteiro, J.M., "Concrete: Sctructure, Properties and Materials", 2<sup>nd</sup> edition, Prentice Hall, Inc., 1993

[12]: Powers, T.C., "Properties of Fresh Concrete", John Wiley and Sons, Inc., 1968

[13]:Radocea, A., "A Study on the mechanisms of Plastic Shrinkage of Cement-based Materials", Sweeden 1992.

[14]:Zhang M.H., Tam C.T., Leow M.P., "effect of water-to-cementious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete", Cement and Concrete Research 33 (2003) 1687-1694

[15]Sousa Coutinho A., "Fabrico e propriedades do betão", Volume I, Lisboa 2006

[16]Sampaio J. et al; "melhoria de desempenho de betões pelo metacaulino", Departamento de engenharia civil, FEUP, Porto 2001

[17] Gleize Philippe J.P et al., "effects of metakaolin on autogenou shrinkage of cement pastes", Cement & Concrete Composites, 29 (2007) 80-87

[18] Brooks jj, et al., "effect of metakaolin on creep and shrinkage concrete", Cement & Concrete Composites 23 (2001) 495-502

[19] Termkhajornkit Pipat, et al, "effect of fly ash on autogenous shrinkage", Cement and Concrete Research 35(2005) 473-482

[20] S. Tangteemsirikul, "effect of chemical composition and particle size on fly ash on autogenous shrinkage of paste" in: E- Tazawa (Ed.), *proceedings of the international workshop on Autogenous shrinkage of concrete*,JCI, Hiroshima, Japan 1998, pp 175-186

[21] Bouasker M. et al; “Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions”, Cement & Concrete Composites 30(2008)13-22.

[22] Jensen O., “autogenous phenomena in cement-based materials”, department of building technology and structural engineering Alborg University, Set 2005, pp. 131

[23] Relatório 431/2010 “ autogenous shrinkage measurements on cement pastes: influence of W/C, cement fineness, C3A content, and superplasticizer dosage”, LNEC, Lisboa, Dezembro 2010, pp 35,36.

**Normas:**

[24] Instituto Português da Qualidade (IPQ) – Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. Caparica: IPQ, 2006. NP EN 196-1:2006.

[25] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) – Pastas de cimento – Determinação da retracção autógena. Lisboa: LNEC, 2007. E 476-2007.

[26] Instituto Português da Qualidade (IPQ) – Métodos de ensaio de cimentos – Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade: IPQ, 2009. NP EN 196-3:2005.

[27] ASTM C1608-07: Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste.

[28] ASTM C150-07: Standard Specification for Portland cement.



## Anexos

---



*Anexo 1*

*Resultados do ensaio de tempo de presa segundo a norma  
NP EN 196-3*

Amostra	TIP (min)	TFP (min)
Secil Padrão	443	530
Cimpor Padrão	253	365
Sec C.V. 15%	510	628
Sec C.V. 30%	565	655
Cimp C.V. 15%	359	480
Cimp C.V. 30%	306	470
Sec Met 10%	364	460
Sec Met 20%	264	359
Cimp Met 10%	203	251
Cimp Met 20%	148	207
Sec S.F. 5%	408	519
Sec S.F. 10%	375	477
Cimp S.F. 5%	233	360
Cimp S.F. 10%	230	315
Sec F.C. 15%	495	615
Sec F.C. 30%	460	585
Cimp F.C. 15%	275	425
Cimp F.C. 30%	295	425

**Quadro A.1.** Resultados do ensaio de tempo de presa segundo a norma NP EN 196-3



*Anexo 2*

*Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão)  
segundo a norma NP EN 196-1*

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	83,131	13,057
	83,363	
28	88,613	12,949
	90,013	
28	86,775	14,548
	89,756	

**Quadro A.2.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Secil Padrão

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	76,838	10,498
	76,350	
28	90,238	8,053
	97,488	
28	97,300	8,152
	94,263	

**Quadro A.3.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Secil + Cinzas Volantes 15%

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	62,325	9,298
	63,150	
28	86,525	11,824
	85,538	
28	78,381	10,901
	82,625	

**Quadro A.4.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Secil + Cinzas Volantes 30%

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	86,681	12,323
	85,131	
28	97,844	12,973
	105,706	
28	108,294	10,455
	103,688	

**Quadro A.5.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Secil + Metacaulino 10%

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	74,513	9,581
	71,875	
28	102,919	10,758
	99,269	
28	90,713	11,037
	88,525	

**Quadro A.6.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Secil + Metacaulino 20%

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	78,538	11,370
	62,350	
28	96,606	12,239
	96,294	
28	99,256	11,888
	99,906	

**Quadro A.7.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Secil + Sílica de Fumo 5%

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	78,031	11,370
	77,113	
28	96,500	12,239
	101,138	
28	94,525	11,888
	99,119	

**Quadro A.8.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Secil + Sílica de Fumo 10%

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	70,819	11,058
	72,006	
28	92,825	12,180
	91,738	
28	91,838	11,355
	92,819	

**Quadro A.9.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Secil + Filer Calcário 15%

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	61,994	9,164
	65,519	
28	79,275	10,798
	77,381	
28	79,431	11,435
	82,788	

**Quadro A.10.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Secil + Filer Calcário 30%

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	72,150	13,076
	70,519	
28	86,588	10,390
	83,019	
28	87,03125	12,438
	85,381	

**Quadro A.11.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Cimpor Padrão

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	58,063	8,902
	57,775	
28	73,294	9,757
	71,694	
28	72,700	10,305
	75,319	

**Quadro A.12.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Cimpor + Cinzas Volantes 15%.

Idade (Dias)	Resistência (Mpa)	
	Flexão	Compressão
7	57,769	8,674
	57,594	
28	71,838	7,219
	74,181	
28	72,238	7,383
	73,363	

**Quadro A.13.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Cimpor + Cinzas Volantes 30%.

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	71,700	11,791
	73,050	
28	83,456	13,413
	89,000	
28	85,281	12,335
	83,013	

**Quadro A.14.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Cimpor + Metacaulino 10%.

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	77,944	13,052
	78,494	
28	84,006	14,611
	80,075	
28	83,719	14,002
	83,556	

**Quadro A.15.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Cimpor + Metacaulino 20%.

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	68,450	12,352
	64,494	
28	84,100	11,609
	80,163	
28	86,119	12,298
	81,938	

**Quadro A.16.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Cimpor + Sílica de Fumo 5%

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	74,519	13,104
	72,656	
28	82,606	10,444
	77,200	
28	83,669	12,577
	84,425	

**Quadro A.17.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Cimpor + Sílica de Fumo 10%

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	61,394	10,540
	60,050	
28	79,956	8,414
	74,906	
28	79,663	9,750
	72,844	

Quadro A.18. Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Cimpor + Filer Calcário 15%

Idade (Dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
7	59,619	9,157
	55,375	
28	69,313	9,595
	70,556	
28	70,338	9,600
	69,394	

**Quadro A.18.** Resultados dos ensaios mecânicos (flexão e compressão) segundo a norma NP EN 196-1 na amostra Cimpor + Filer Calcário 30%

