

4

Resultados

O mapa de cores que acompanha as seções transversais mostra a variação da atenuação dos raios X pelo material analisado. As áreas coloridas de azul escuro representam regiões de baixa densidade, enquanto as áreas coloridas de vermelho representam regiões de alta densidade. Os tons intermediários presentes no mapa representam densidades também intermediárias. O negro representa regiões com números CT abaixo do limite inferior da escala escolhida, enquanto a cor vermelho-arroxeadada representa regiões com números CT acima do limite superior.

As imagens tomográficas foram trabalhadas e reconstruídas através do software Imago. As seções transversais são acompanhadas das respectivas posições em relação à base do corpo de prova que é mostrada pela (Imagem Piloto).

Os resultados estão apresentados de acordo com a metodologia utilizada para melhor compreensão.

4.1

Metodologia

As características dos corpos de prova utilizados nestes ensaios estão relatadas na Tabela 4.01.

Tabela 4.01 – Características dos corpos de prova

Corpo de prova	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Altura (mm)	Tipo de arenito
4C	49,9	16	100	Sintético
5B	50	16	99,95	Sintético
9	50,03	16	100,2	Sintético

Para estes corpos de prova foram feitas aquisições de imagens em tempo real, durante a aplicação da pressão confinante através do Pressurizador com rampa contínua e gradativa de 0 a 40MPa em torno de 45 minutos e com um controle de taxa de 0,15 bar/seg.

A figura 4.01 mostra a imagem piloto do corpo de prova 4C com o plano de estudo utilizado nestes ensaios.

Depois de completado o exame longitudinal, foram obtidas imagens tomográficas definidas pelo plano de cortes com imagens das seções transversais dos corpos de prova com espessura de 5mm com pressão confinante nula (ver figuras 4.02).

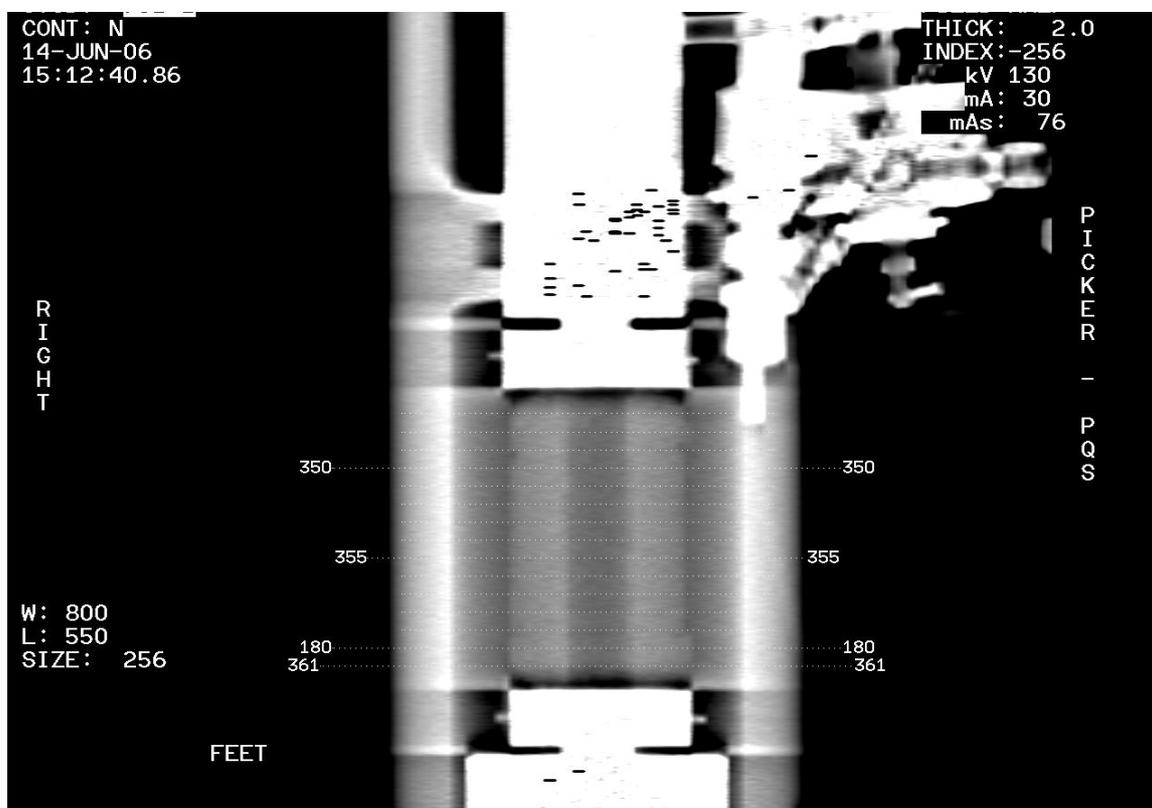


Figura 4.01 – Imagem Longitudinal do corpo de prova apresentado o plano de cortes.

Em seguida as pressões confinantes foram aplicadas em carregamentos contínuos e identificadas em estágios de aquisições de imagens tomográficas definidas como Planos de estudo. Não houve carregamento axial.

As imagens adquiridas são apresentadas nas figuras 4.02 a 4.05 para o corpo de prova 4C; 4.09 a 4.12 para o 5B; 4.16 a 4.19 para o 9 e, 4.23 a 4.26 para o 10B;

4.30 a 4.33 para 8B; 4.37 a 4.40 para o 3B; 4.43 a 4.46 para o S-1; 4.48 a 4.51 par o S-2 com o carregamento da pressão confinante.

São apresentadas imagens da seqüência da propagação da ruptura para estes corpos de prova.

Também são apresentadas imagens de subtração de imagens do estágio 0 e do último estágio para estes corpos de prova, exceção feita, ao corpo de prova S-1 devido ao seu colapso global.

Com a compressão da amostra, o material do pistão (aço) aparece na primeira seção do último estágio de carregamento do corpo de prova 3B, aumentando a densidade da imagem tomográfica. Por isso, apaarece na primeira seção uma densidade acima do limite máximo da escala de cores determinada.

A partir da subtração, pode-se realizar uma estimativa da área do *breakout* formado. O cálculo, assim como a subtração, são efetuados através do software Imago. A ferramenta que permite o cálculo é chamada ROI (Região de Interesse), que informa quantos pixels possuem uma determinada área dentro de uma faixa de valores de CT preestabelecidos. A seqüência de cálculo é apresentada a seguir:

1. Primeiramente, aplica-se ROI em toda seção transversal do corpo de prova para obter a quantidade de pixels que a área possui (área total);
2. Em seguida, estipula-se o intervalo de números CT em que a região de interesse está (mapa de cores);
3. Entrando com os valores de CT, a ferramenta ROI estima a porcentagem de pixels da área total que se apresenta dentro desta faixa de CTs (% ROI);

$$100\% \frac{\text{Área total (pixels)}}{\text{breakout (pixels)}} \quad (1)$$

4. Como cada pixels tem uma área igual a $0,5 \text{ mm}^2$, basta fazer outra regra de três simples para estimar a área do *breakout* em mm^2 :

$$\frac{1 \text{ pixel}}{\text{breakout (pixels)}} = \frac{0,5 \text{ mm}^2}{\text{área breakout (mm}^2\text{)}}$$

Para o caso da seção 65,00mm do corpo de prova 4C, temos:

1 – Área Total = 6117 pixels

2 – faixa de CT = 200 a 1033

3 - % ROI = 0,22%

4 –Área *breakout* (mm²) = **679,5 mm²**

Após obtido o valor da área do *breakout*, multiplica-se este valor pela espessura da seção transversal, que neste caso é 5 mm, e em seguida multiplica este volume pelo peso específico a areia (2,65 g/cm³). A escala de números CT para o cálculo foi entre 5 a 1300. Estes cálculos estão apresentados nas tabelas 4.02, 4.03 e 4.04, 4.06, 4.07, 4.08, e 4.10.

CORPO DE PROVA 4C

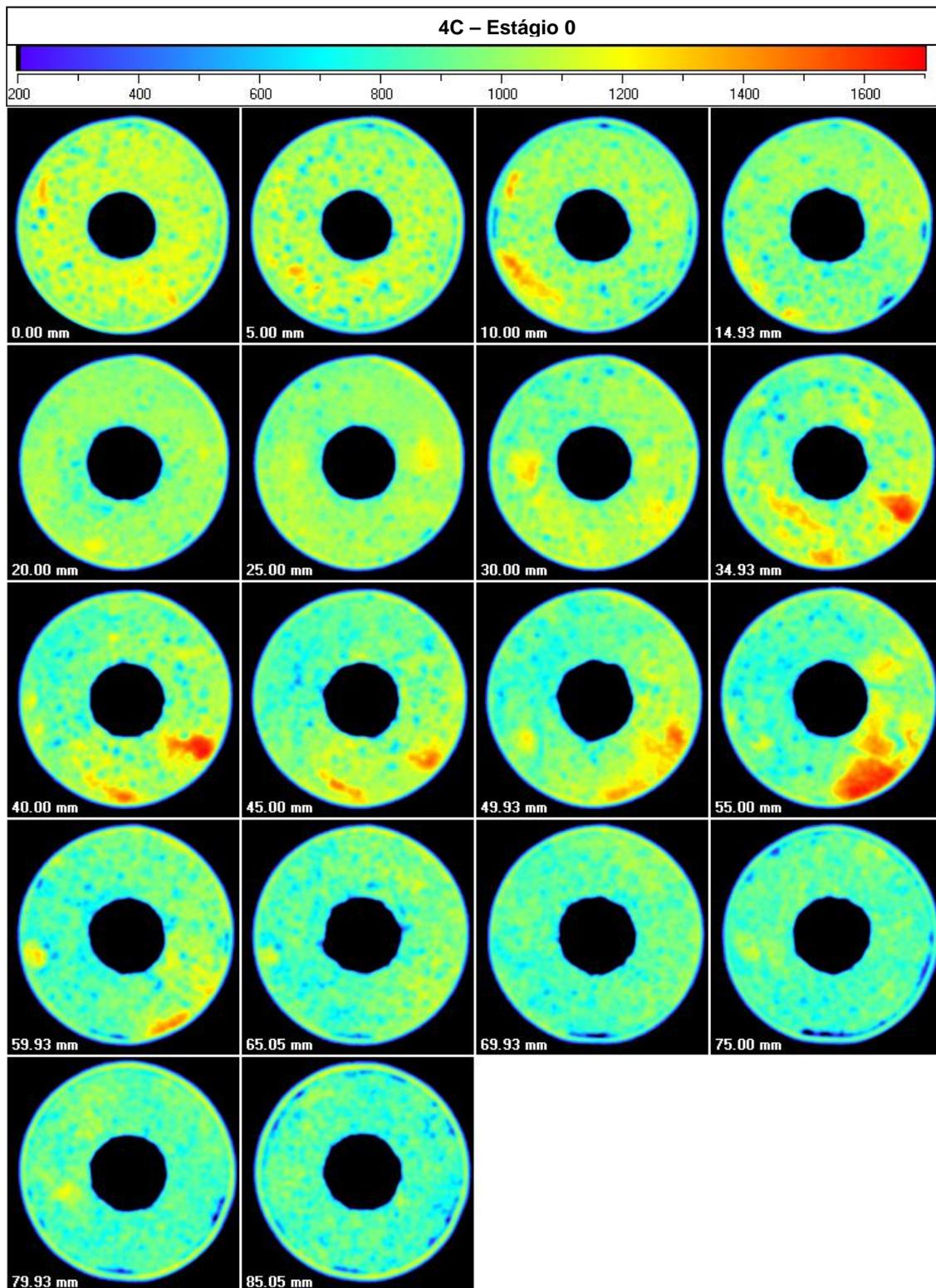


Figura 4.02 – Seções transversais do corpo de prova 4C com pressão confinante nula.

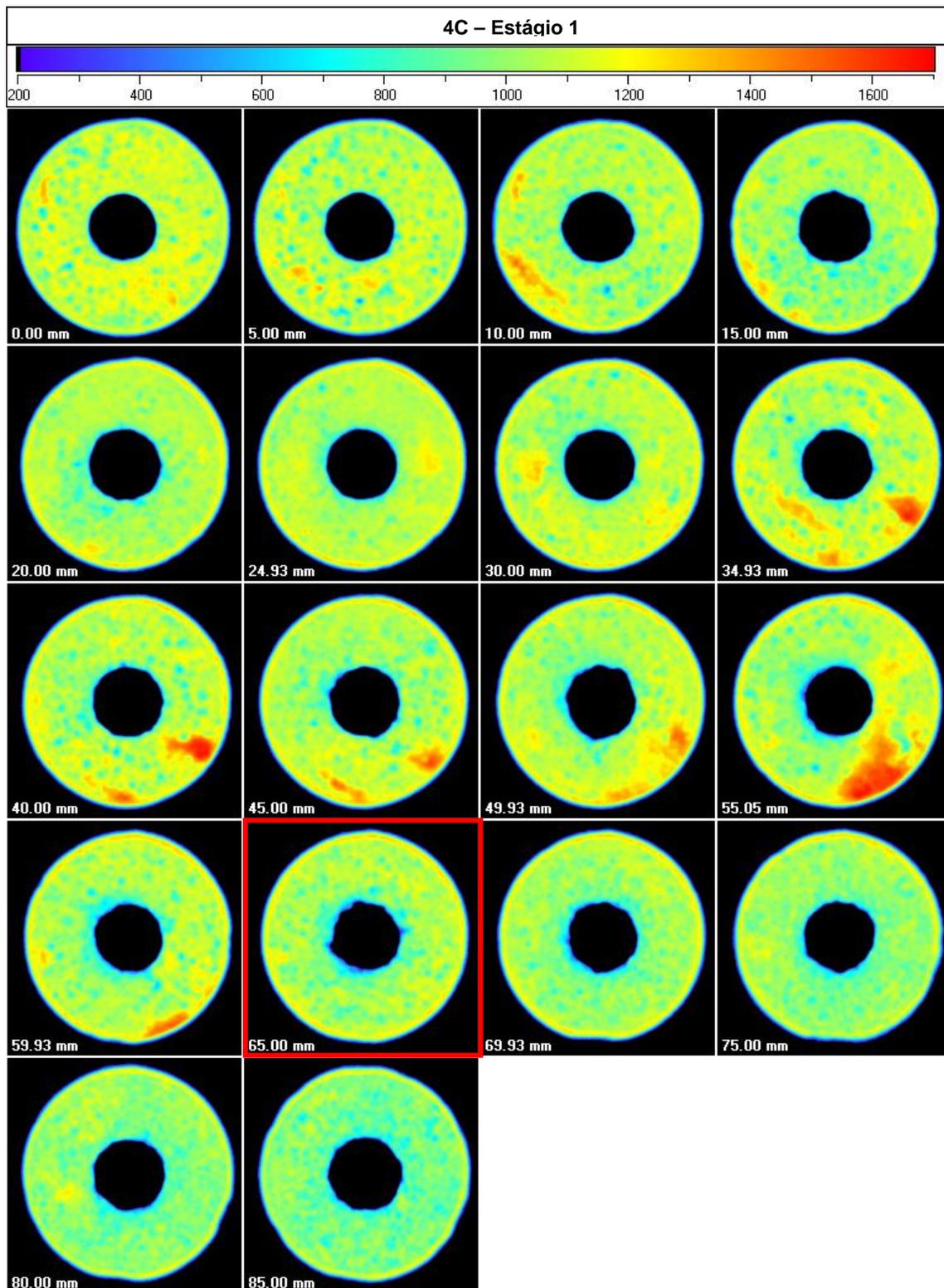


Figura 4.03 – Seções transversais do corpo de prova 4C com pressão confinante de 9,9MPa. Nota-se na seção 65,00 mm o início do breakout. É visto um enfraquecimento do material ao redor da cavidade circular. A sua densidade diminui.

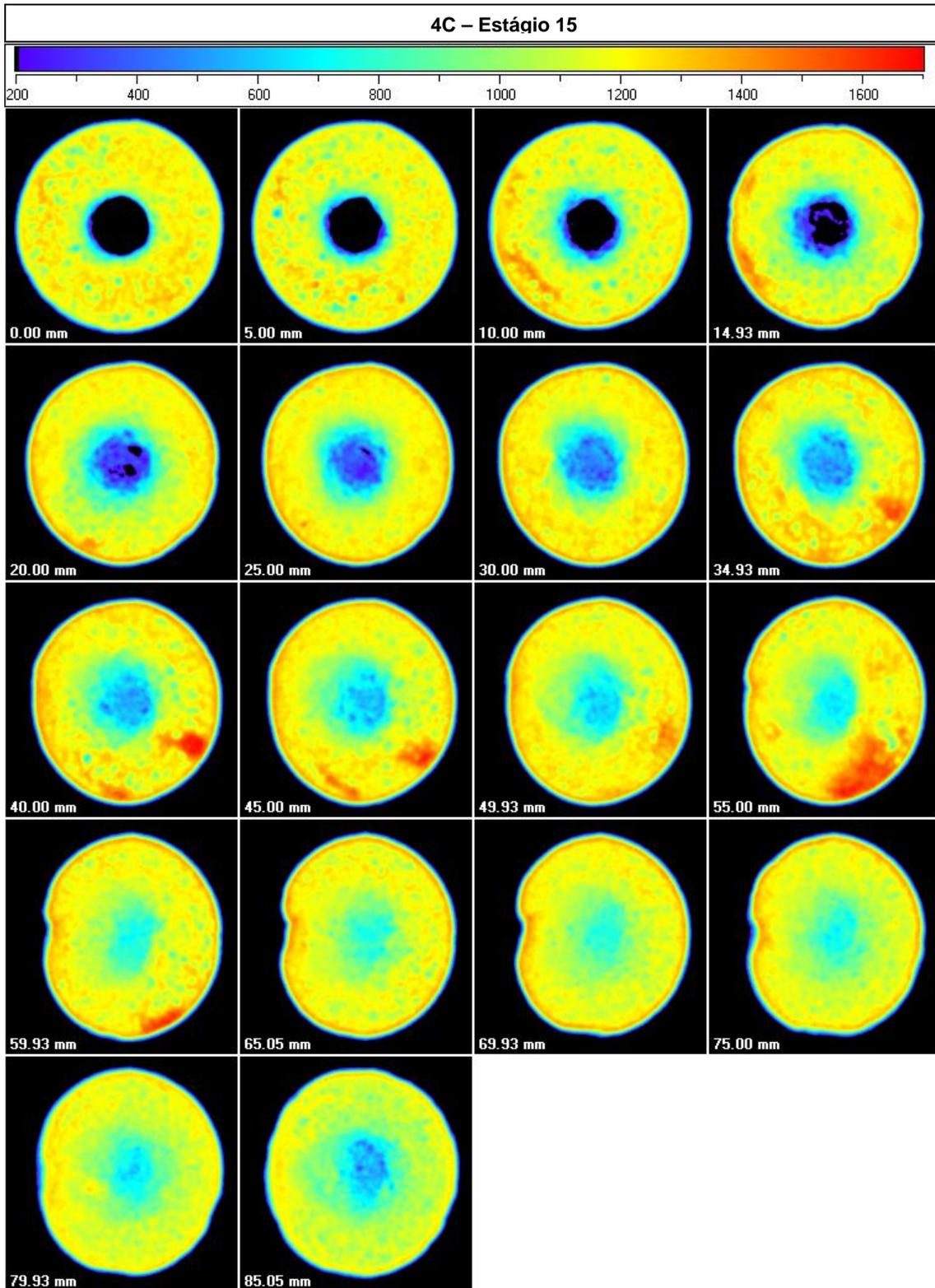


Figura 4.04 – Seções transversais do corpo de prova 4C com pressão confinante de 40MPa. No fim do ensaio, as cavidades são praticamente todas preenchidas. Também foi verificado um aumento da densidade das seções de acordo com o aumento do carregamento.

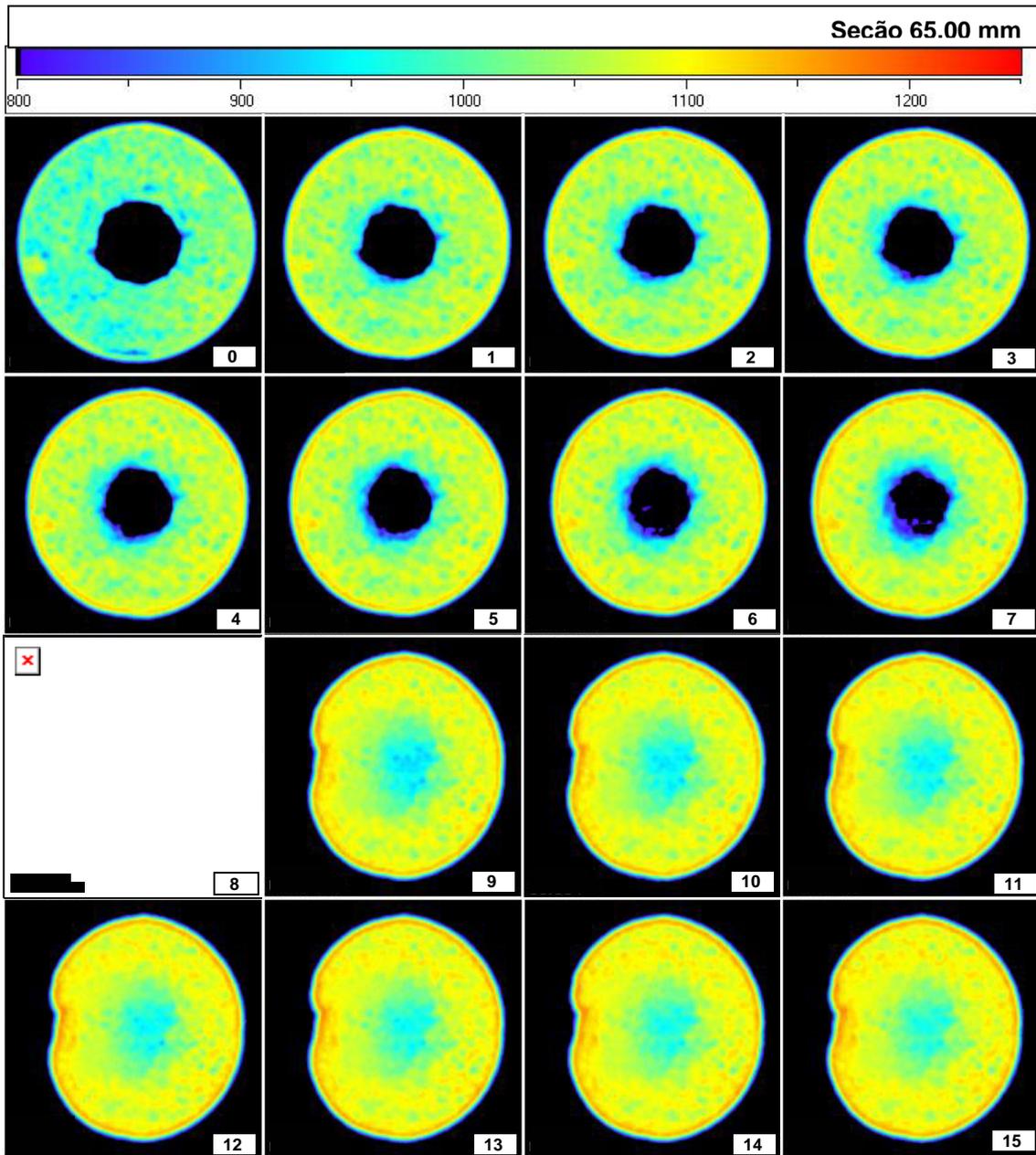


Figura 4.05 – Seqüência da formação de breakout na seção 65,00 mm do estágio 0 ao estágio 15.

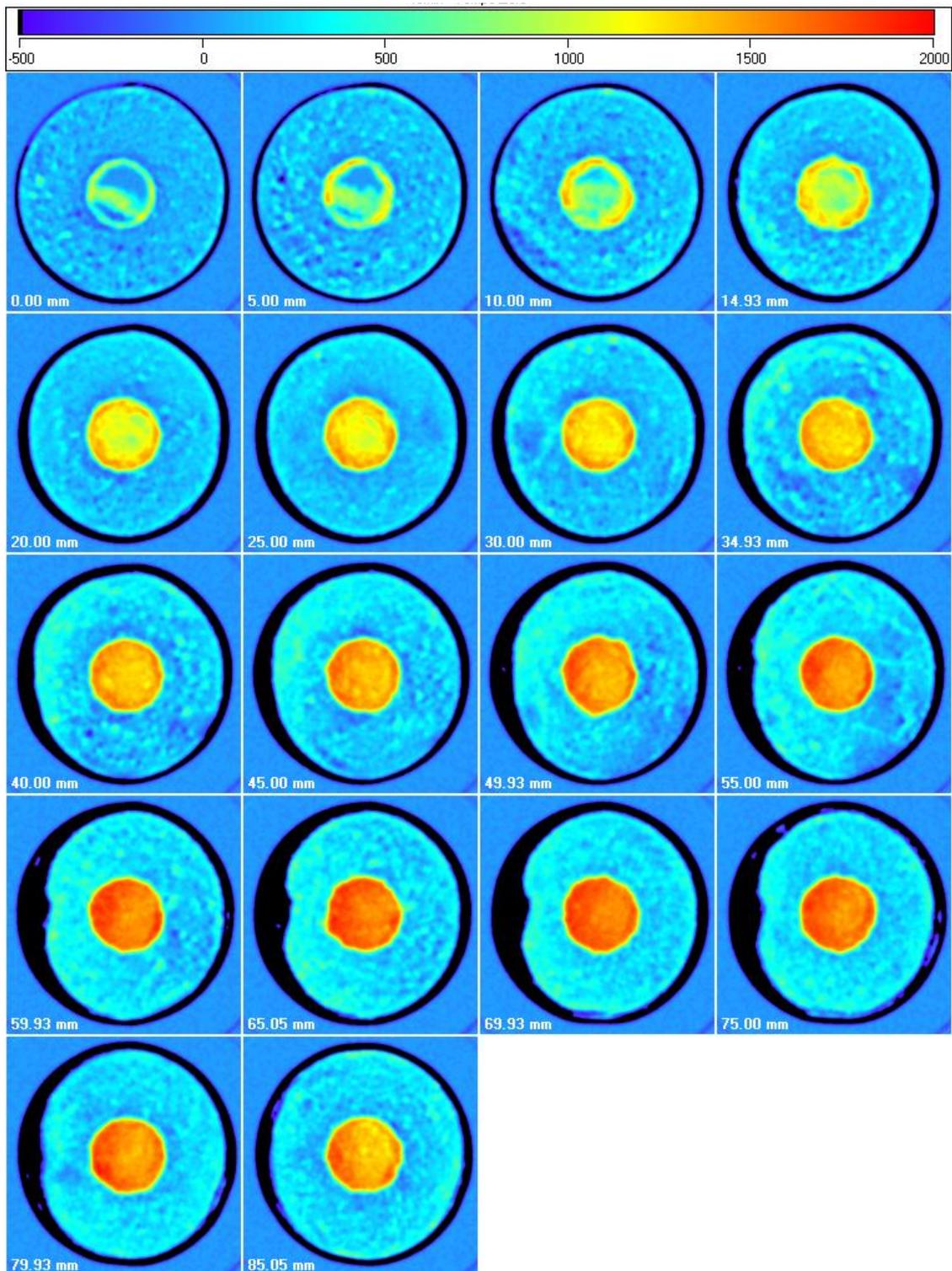


Figura 4.06 – Subtração de imagens do corpo de prova 4C no estágio 0 menos as do estágio 15. Nota-se o preenchimento de praticamente todas as cavidades interna por material granular.

Tabela 4.02 – Estimativa da área de breakout e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova 4C.

Seção	Posição absoluta [mm]	Área Invasada (%)	Área Invasada [Pixel ²]	Área Invasada [mm ²]	Massa de areia (g)
1	1705,5	0,131748	798	399	5,3
2	1710,5	0,180783	1095	547,5	7,3
3	1715,5	0,243355	1474	737	9,8
4	1720,43	0,316163	1915	957,5	12,7
5	1725,5	0,362391	2195	1097,5	14,5
6	1730,5	0,29437	1783	891,5	11,8
7	1735,5	0,292884	1774	887	11,8
8	1740,43	0,300479	1820	910	12,1
9	1745,5	0,313191	1897	948,5	12,6
10	1750,5	0,305927	1853	926,5	12,3
11	1755,43	0,279842	1695	847,5	11,2
12	1760,5	0,213472	1293	646,5	8,6
13	1765,43	0,20984	1271	635,5	8,4
14	1770,55	0,224368	1359	679,5	9,0
15	1775,43	0,238237	1443	721,5	9,6
16	1780,5	0,278356	1686	843	11,2
17	1785,43	0,322437	1953	976,5	12,9
18	1790,55	0,505696	3063	1531,5	20,3
				Total de areia (g)	201,2

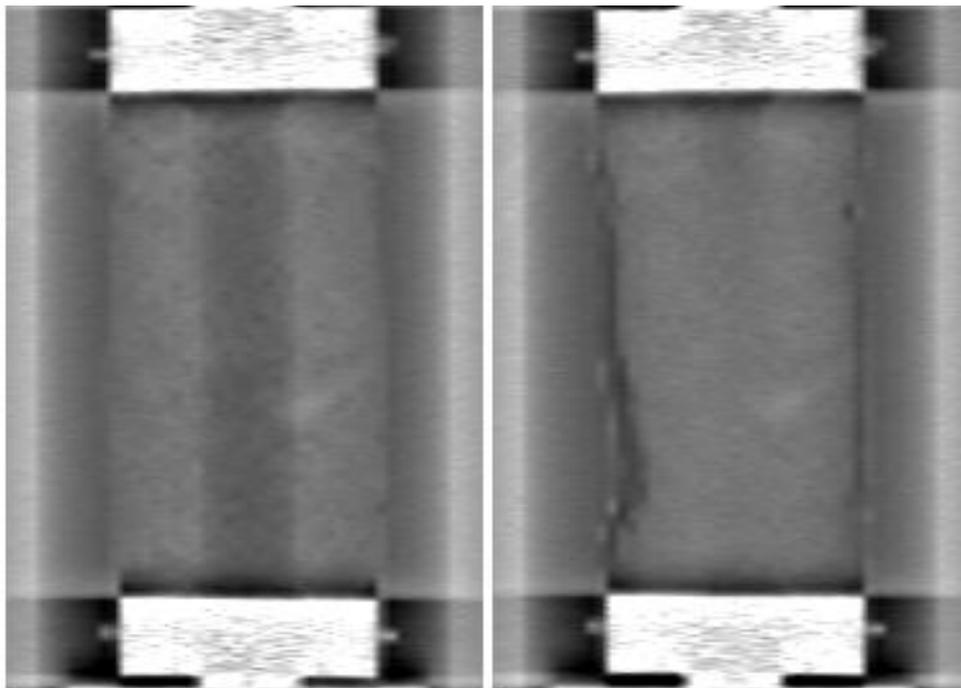


Figura 4.07 – Imagenas Pilotos antes e após o ensaio.



Figura 4.08 – Corpo de prova 4C após o ensaio. Nota-se o preenchimento de praticamente toda a cavidade interna.

CORPO DE PROVA 5B

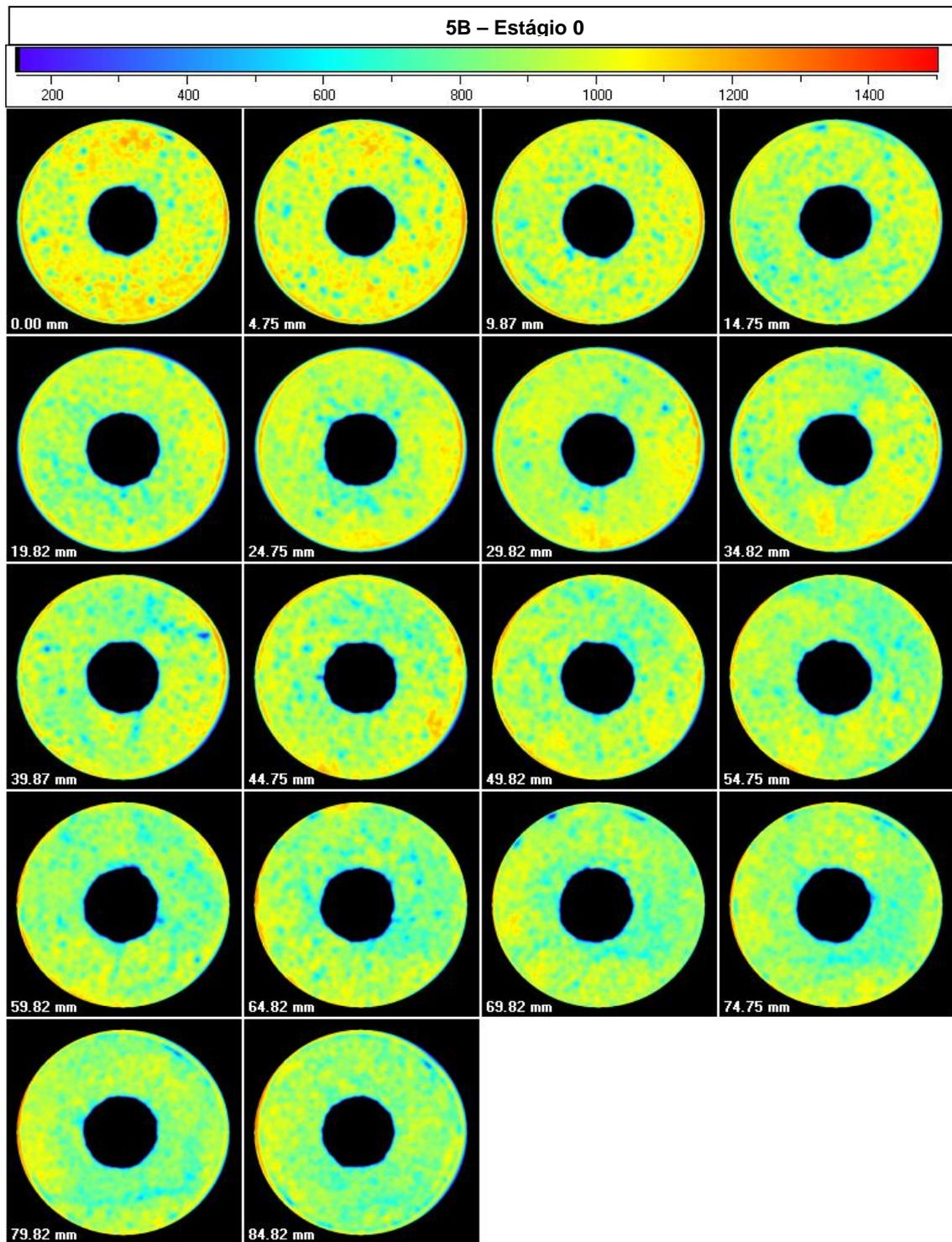


Figura 4.09 – Seções transversais do corpo de prova 5B com pressão confinante nula.

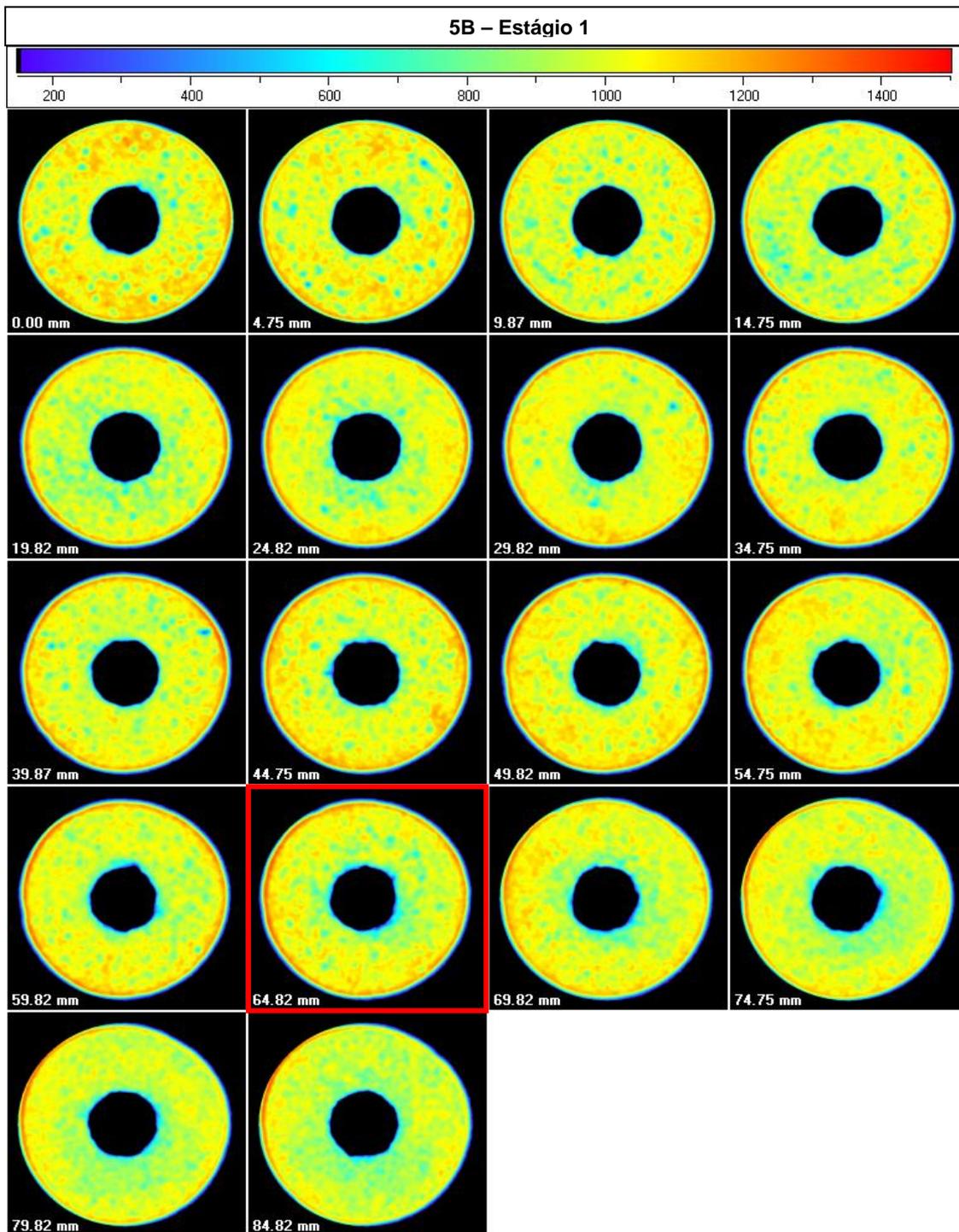


Figura 4.10 – Seções transversais do corpo de prova 5B com pressão confinante 8,8Mpa. Nota-se na seção 64,82mm o início do breakout. É visto um enfraquecimento do material ao redor da cavidade circular. A sua densidade diminui.

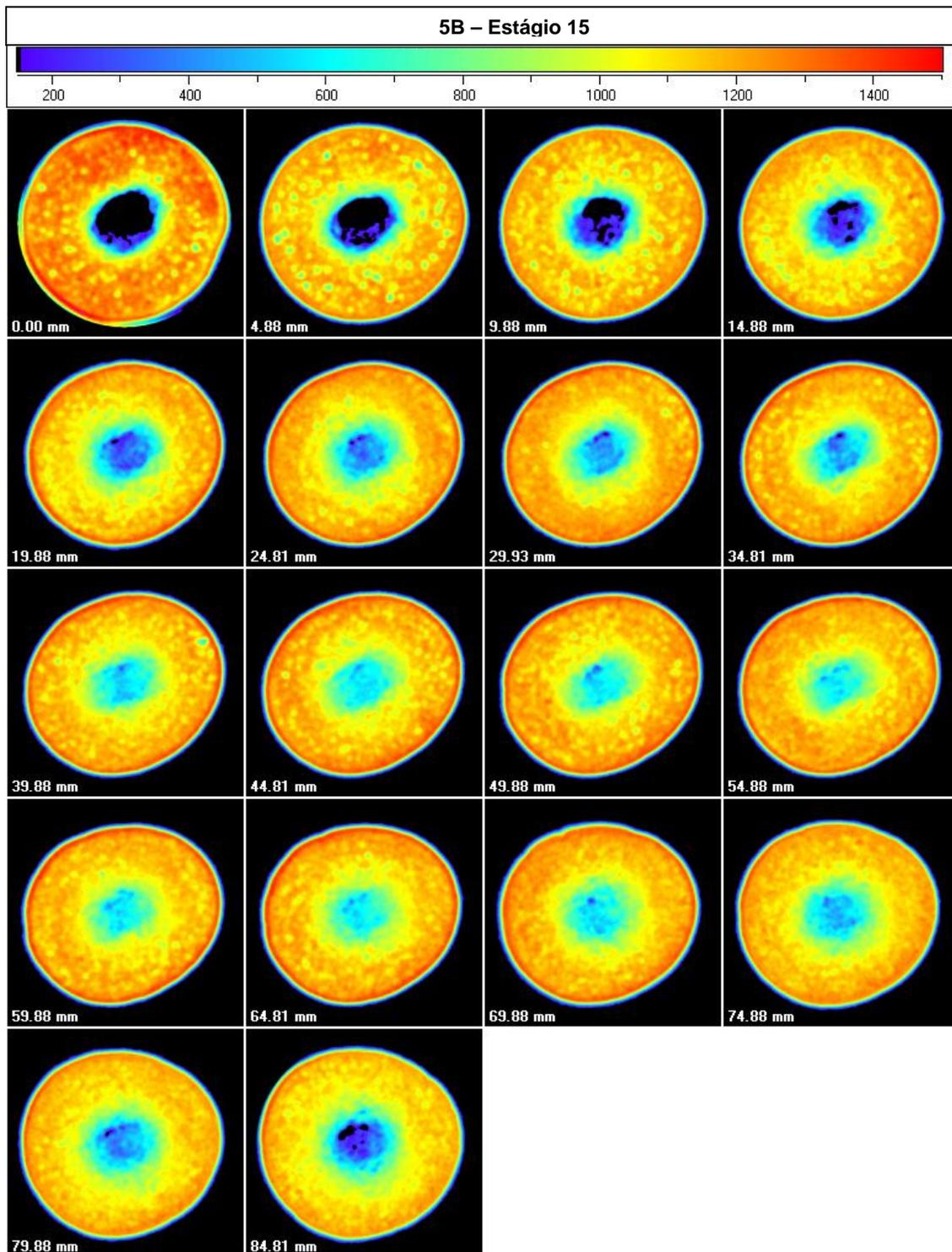


Figura 4.11 – Seções transversais do corpo de prova 5B com pressão confinante 40Mpa. No fim do ensaio, as cavidades são praticamente todas preenchidas. Também foi verificado um aumento da densidade das seções de acordo com o aumento do carregamento.

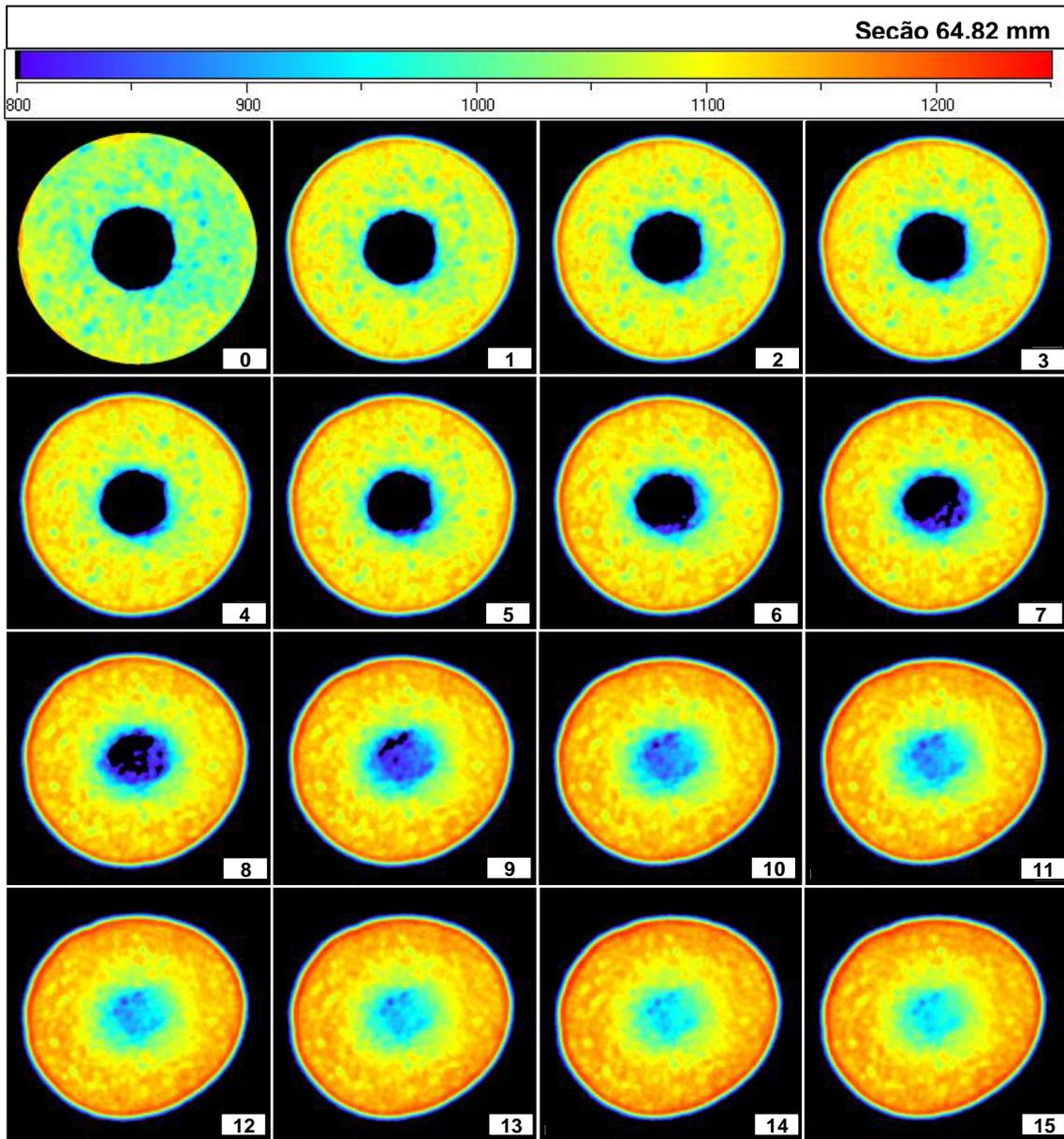


Figura 4.12 – Seqüência da formação de breakout na seção 64,82 mm do estágio 0 ao estágio 15.

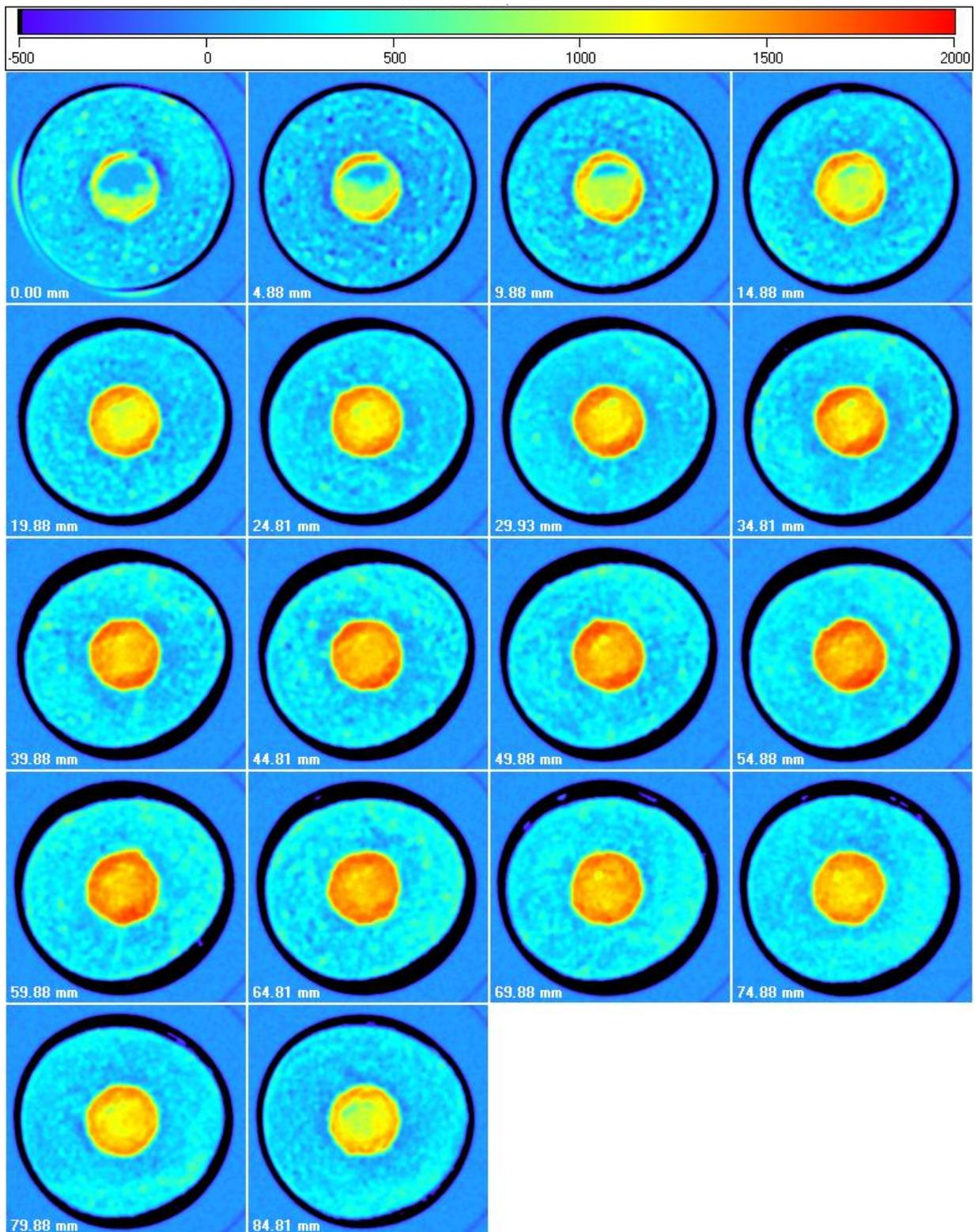


Figura 4.13 – Subtração de imagens do corpo de prova 5B no estágio 0 menos as do estágio 15. Nota-se o preenchimento de praticamente todas as cavidades interna por material granular.

Tabela 4.03 – Estimativa da área de breakout e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova 5B.

Seção	Posição absoluta [mm]	Área Invasada (%)	Área Invasada [Pixel ²]	Área Invasada [mm ²]	Massa de areia (g)
1	1693,12	0,146733	1006	503	6,7
2	1698	0,238623	1636	818	10,8
3	1703	0,230747	1582	791	10,5
4	1708	0,263273	1805	902,5	12,0
5	1713	0,271441	1861	930,5	12,3
6	1717,93	0,258897	1775	887,5	11,8
7	1723,05	0,222287	1524	762	10,1
8	1727,93	0,196762	1349	674,5	8,9
9	1733	0,213098	1461	730,5	9,7
10	1737,93	0,211202	1448	724	9,6
11	1743	0,190928	1309	654,5	8,7
12	1748	0,176342	1209	604,5	8,0
13	1753	0,185385	1271	635,5	8,4
14	1757,93	0,224037	1536	768	10,2
15	1763	0,231476	1587	793,5	10,5
16	1768	0,262398	1799	899,5	11,9
17	1773	0,297404	2039	1019,5	13,5
18	1777,93	0,327596	2246	1123	14,9
				Total de areia (g)	188,4

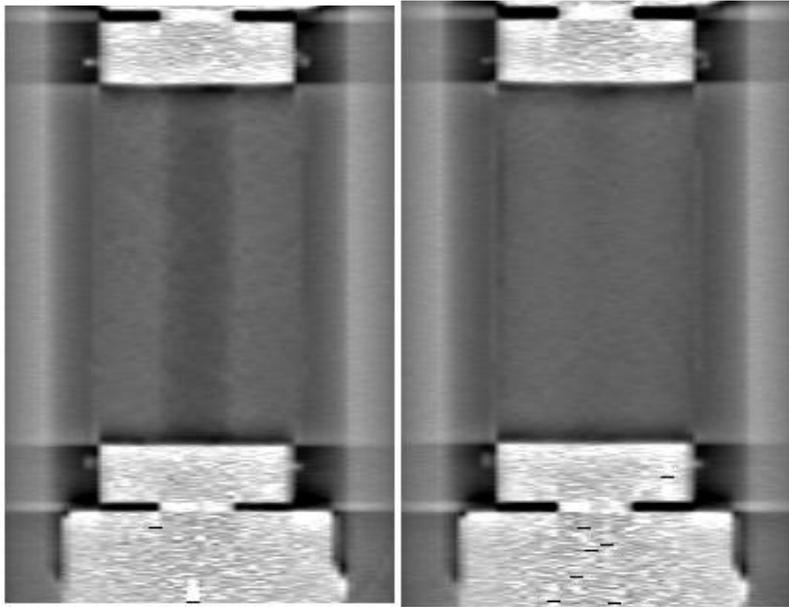


Figura 4.14 – Imagens Pilotos antes e após o ensaio.

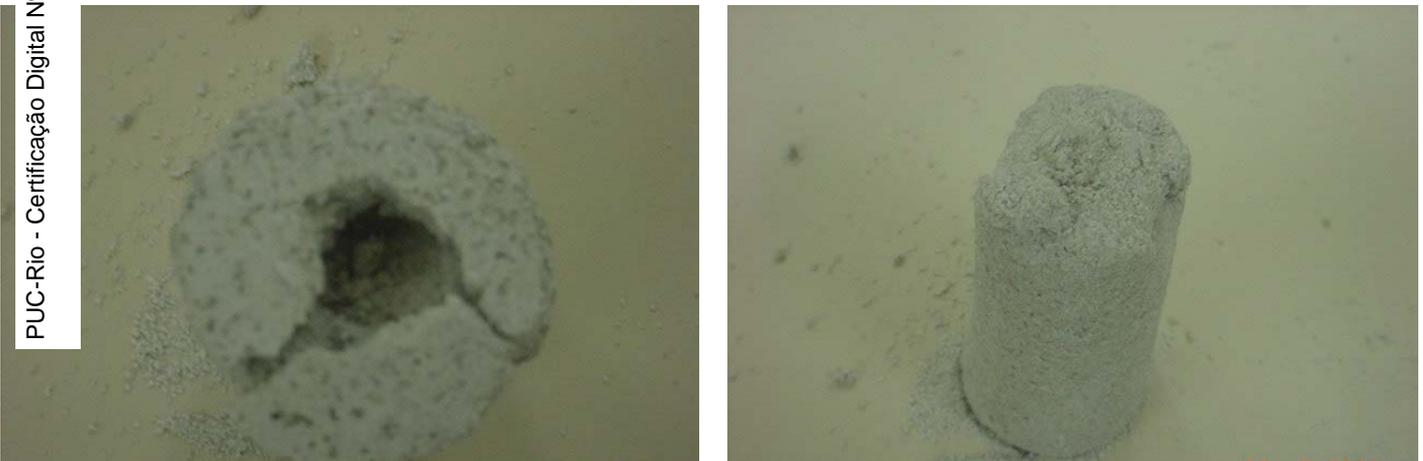


Figura 4.15 – Corpo de prova 5B após o ensaio. Nota-se o preenchimento de praticamente toda a cavidade interna.

CORPO DE PROVA 9

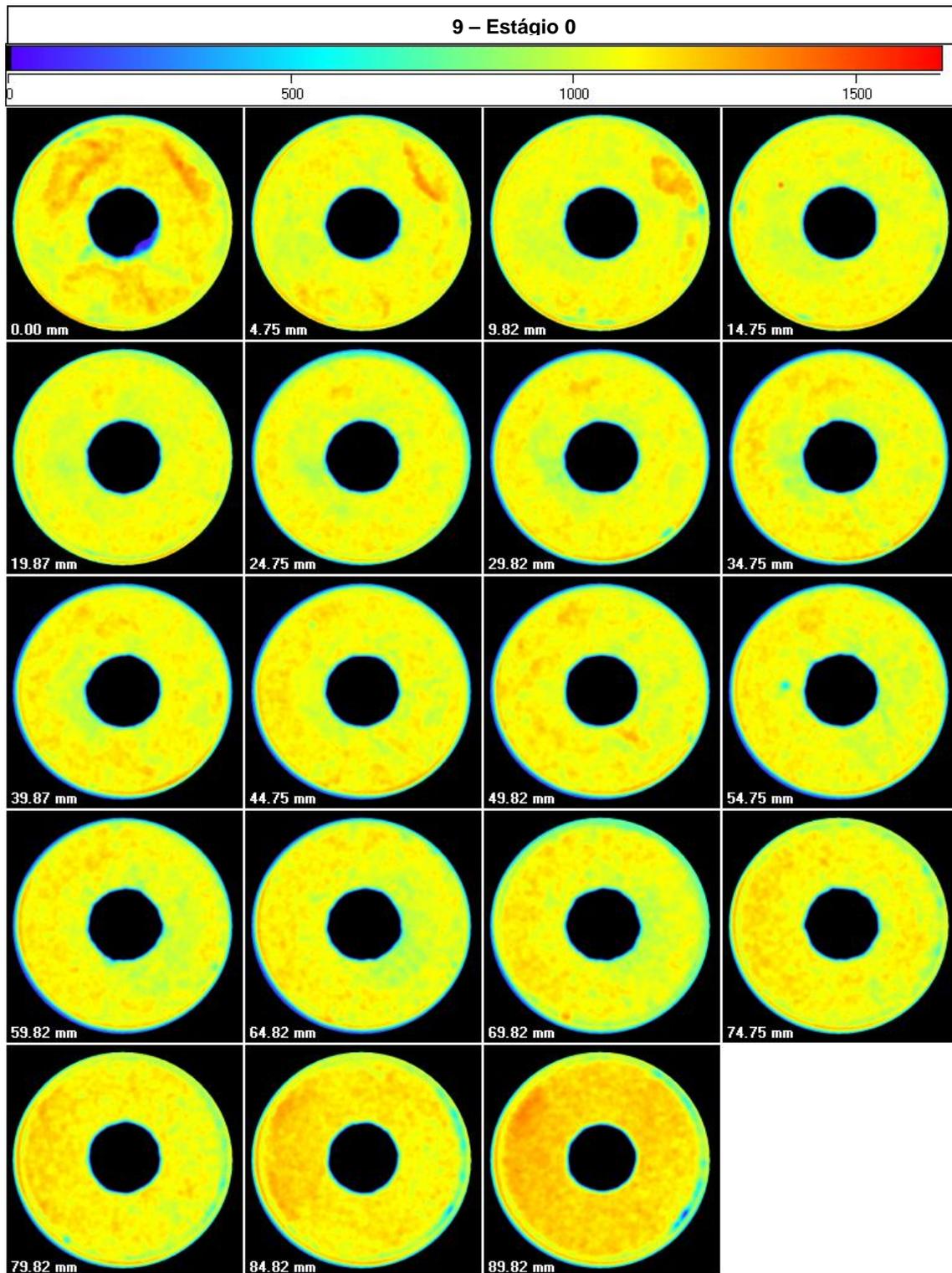


Figura 4.16 – Seções transversais do corpo de prova 9 com pressão confinante nula.

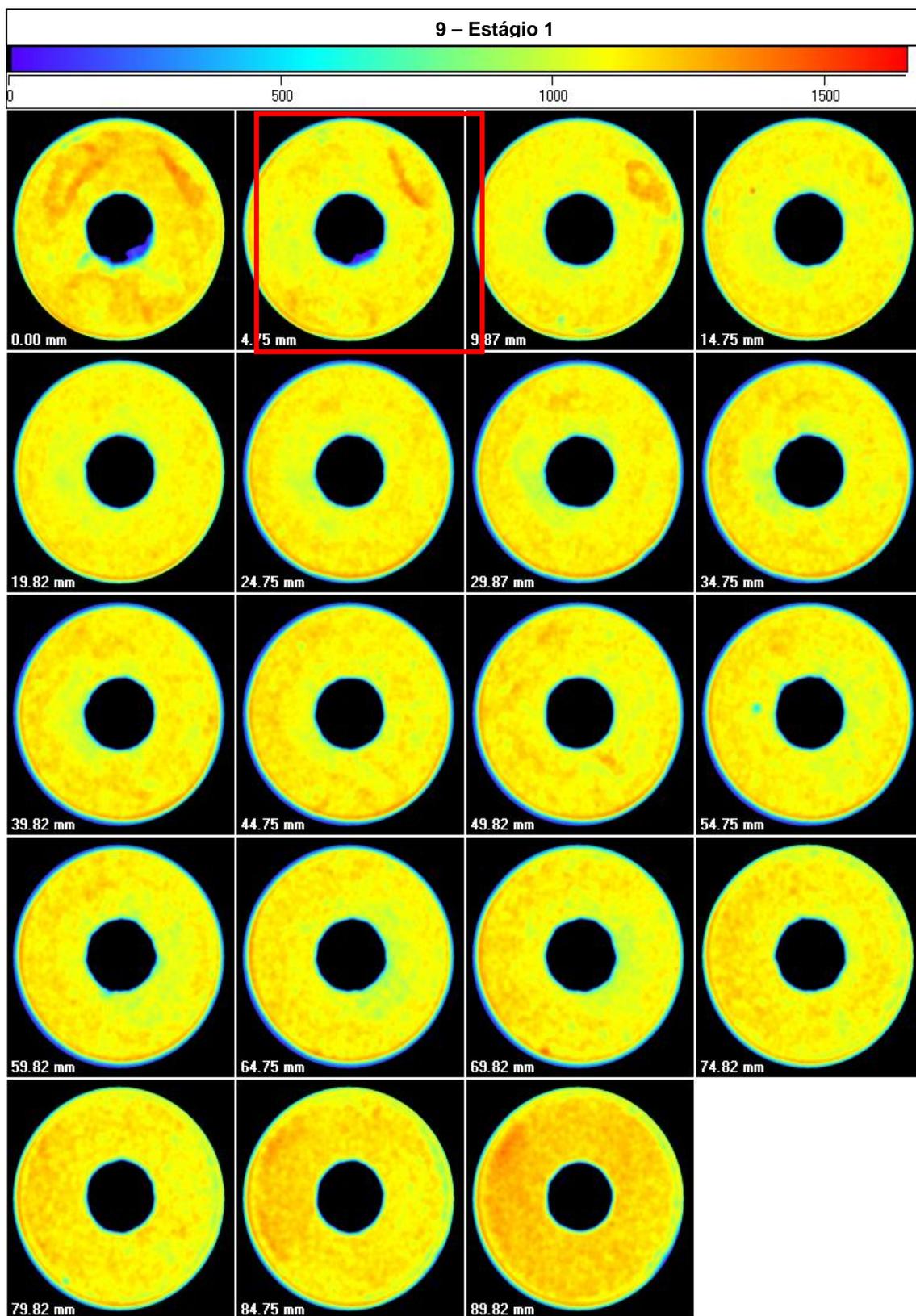


Figura 4.17 – Seções transversais do corpo de prova 9 com pressão confinante 8,1Mpa. Nota-se na seção 4,75mm o início do breakout. É visto um enfraquecimento do material ao redor da cavidade circular. A sua densidade diminui.

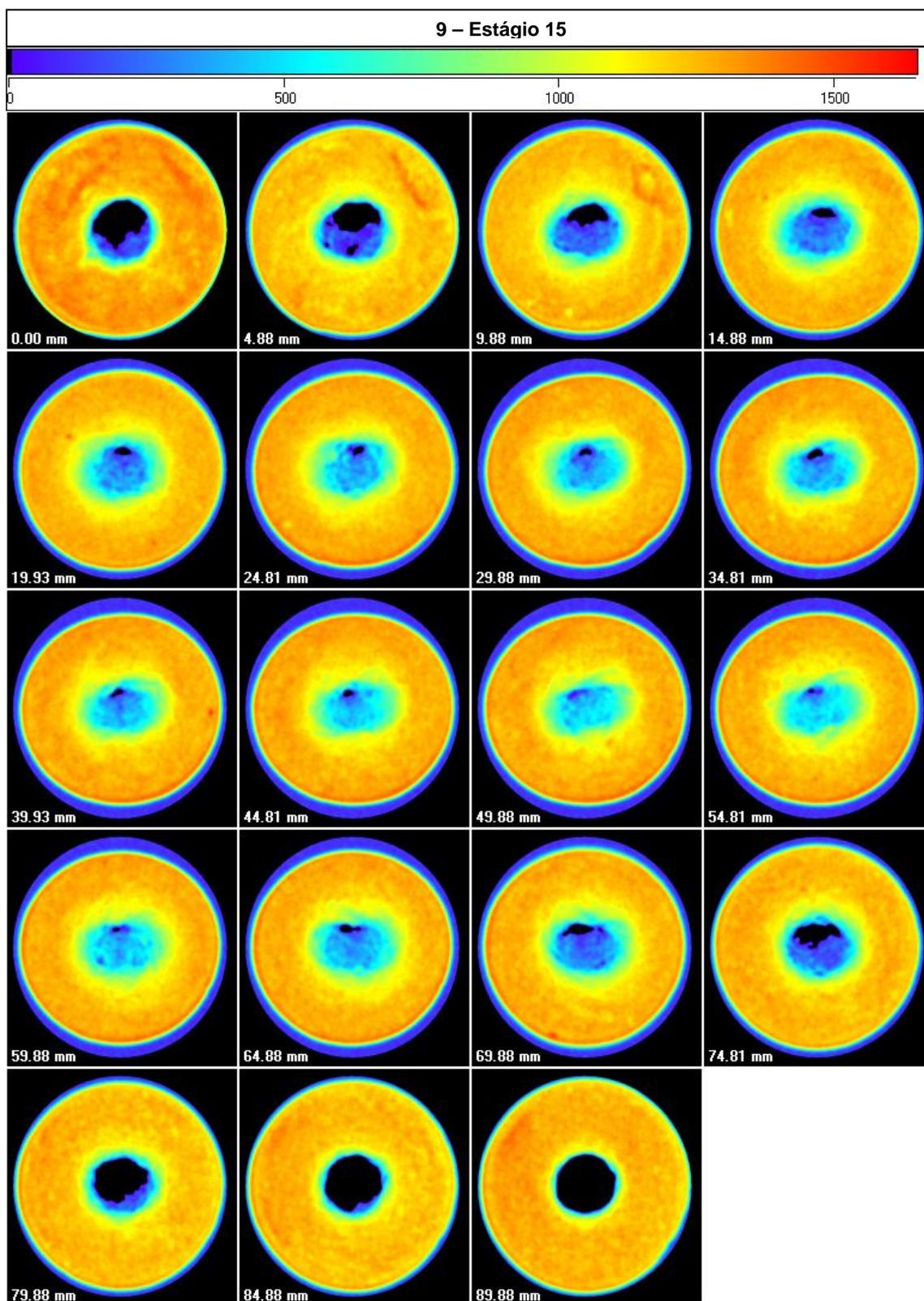
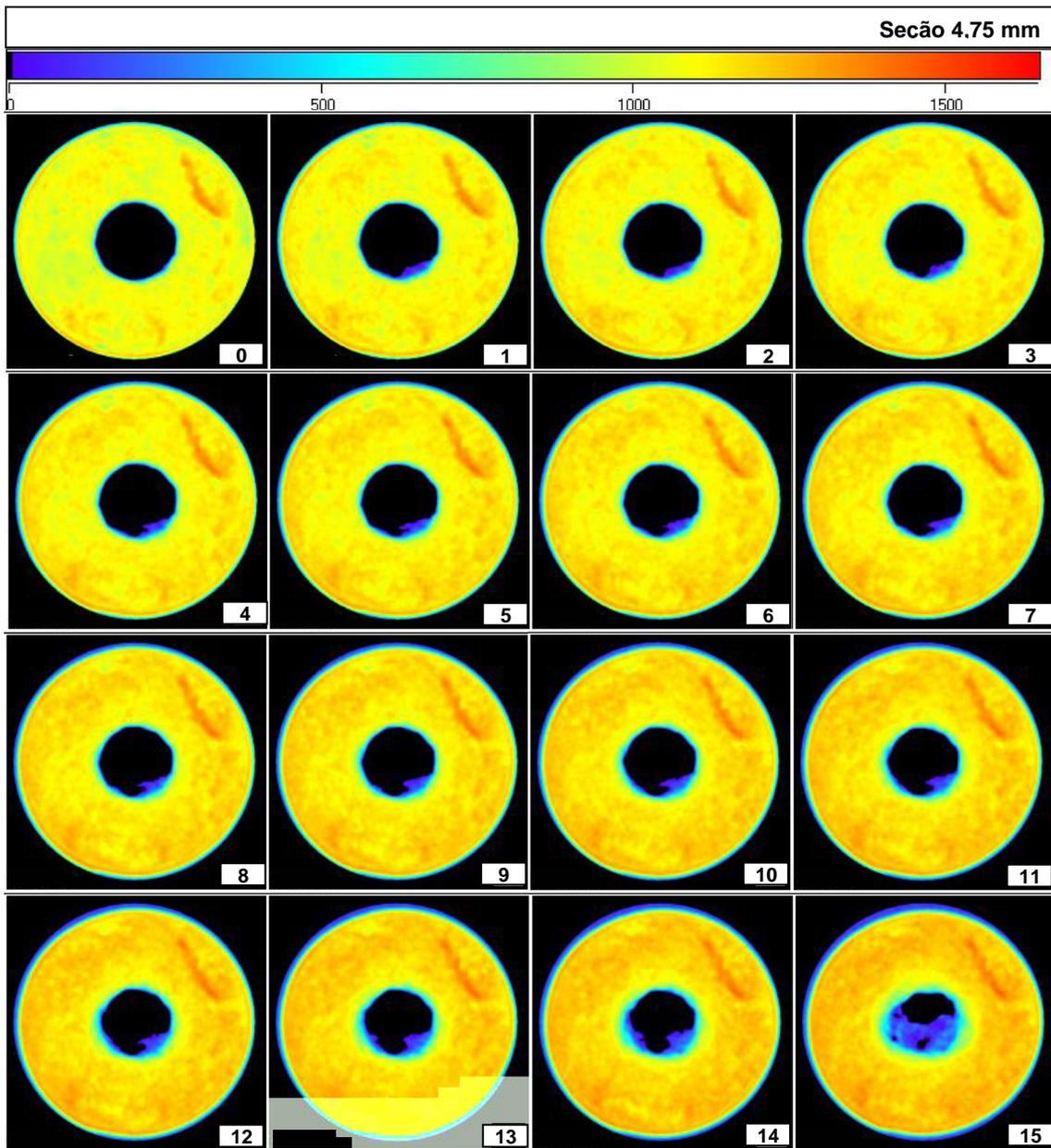


Figura 4.18 – Seções transversais do corpo de prova 9 com pressão confinante de 40Mpa. No fim do ensaio, as cavidades são praticamente todas preenchidas. Também foi verificado um aumento da densidade das seções de acordo com o aumento do carregamento.



4.19 – Sequência da formação de breakout na seção 4,75 mm do estágio 0 ao estágio 15.

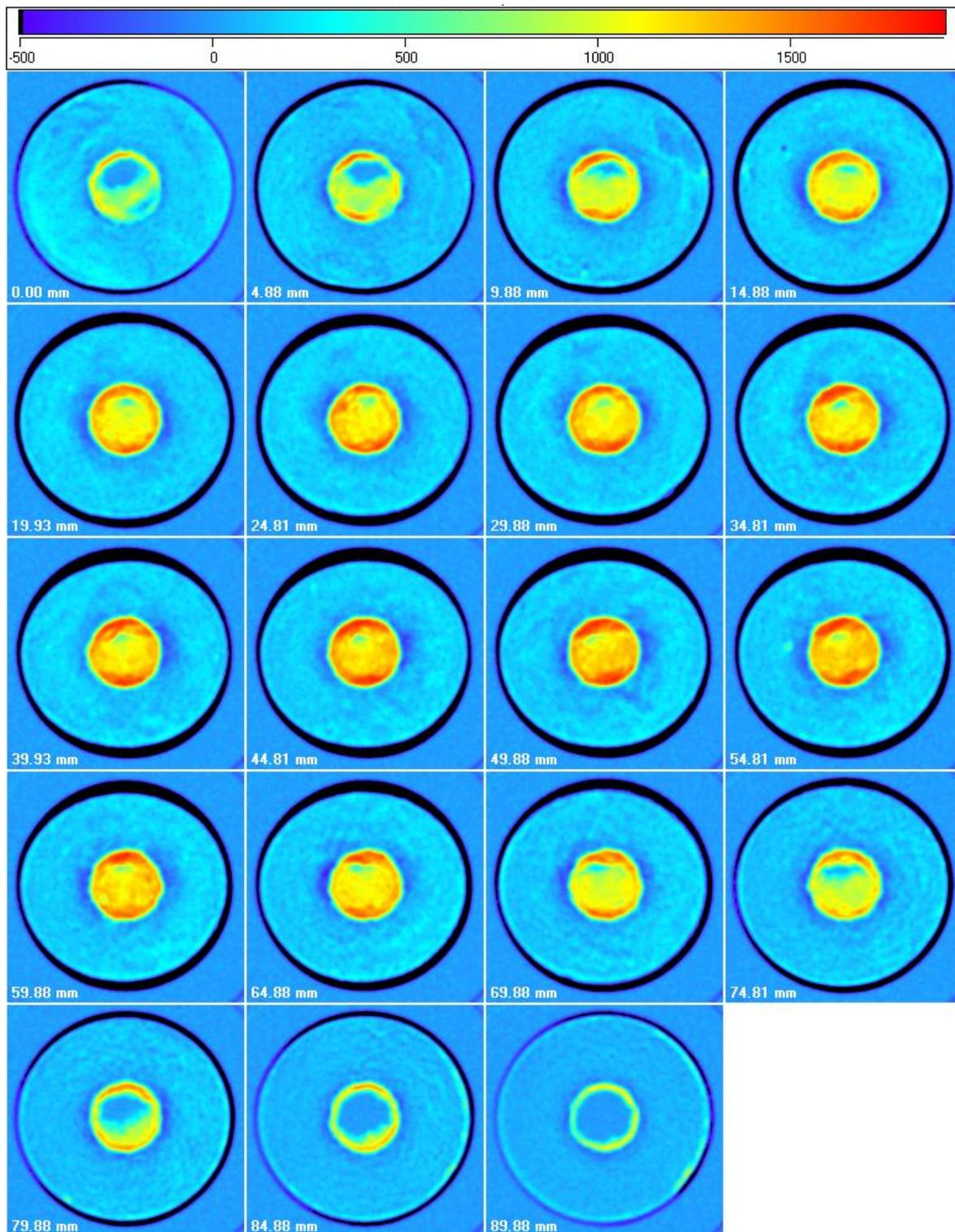


Figura 4.20 – Subtração de imagens do corpo de prova 9 no estágio 0 menos o estágio 15. Nota-se o preenchimento de praticamente todas as cavidades interna por material granular.

Tabela 4.04 – Estimativa da área de breakout e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova 9.

Seção	Posição absoluta [mm]	Área Invasada (%)	Área Invasada [Pixel ²]	Área Invasada [mm ²]	Massa de areia (g)
1	1687,12	0,113228	856	428	5,7
2	1692	0,157275	1189	594,5	7,9
3	1697	0,198016	1497	748,5	9,9
4	1702	0,228042	1724	862	11,4
5	1707,05	0,22037	1666	833	11,0
6	1711,93	0,206614	1562	781	10,3
7	1717	0,198942	1504	752	10,0
8	1721,93	0,189683	1434	717	9,5
9	1727,05	0,191799	1450	725	9,6
10	1731,93	0,185317	1401	700,5	9,3
11	1737	0,189153	1430	715	9,5
12	1741,93	0,207804	1571	785,5	10,4
13	1747	0,217989	1648	824	10,9
14	1752	0,225661	1706	853	11,3
15	1757	0,228307	1726	863	11,4
16	1761,93	0,190212	1438	719	9,5
17	1767	0,132407	1001	500,5	6,6
18	1772	0,0874339	661	330,5	4,4
				Total de areia (g)	168,7

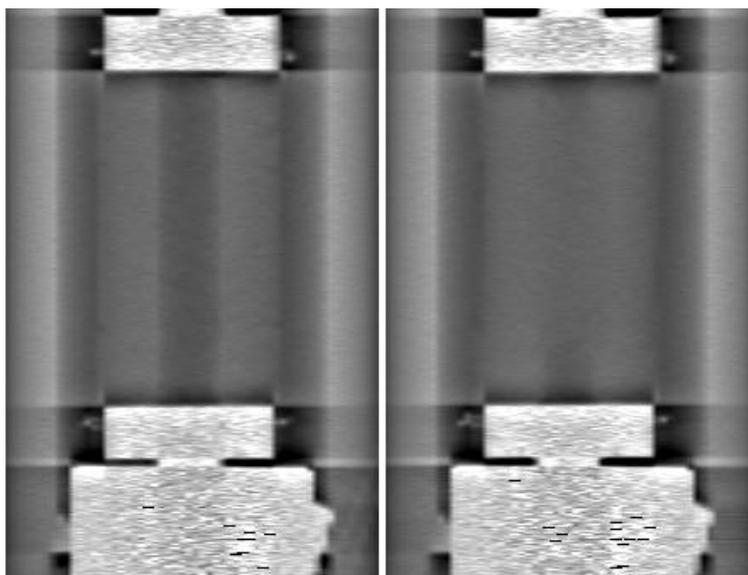


Figura 4.21 – Imagens Pilotos antes e após o ensaio



Figura 4.22 – Corpo de prova 9 após o ensaio. Nota-se o preenchimento de praticamente toda a cavidade interna.

Tabela 4.05 – Características dos corpos de prova

Corpo de prova	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Altura (mm)	Tipo de arenito
8B	50,2	16	100	Sintético
10B	49,8	16	99,85	Sintético
3B	50	16	99,89	Sintético

Para estes corpos de prova foram feitas aquisições de imagens em tempo real, durante a aplicação da pressão confinante através do Pressurizador com rampa contínua e gradativa de 0 a 40MPa em torno de 26 minutos e com um controle de taxa de 0,25 bar/seg.

CORPO DE PROVA 10B

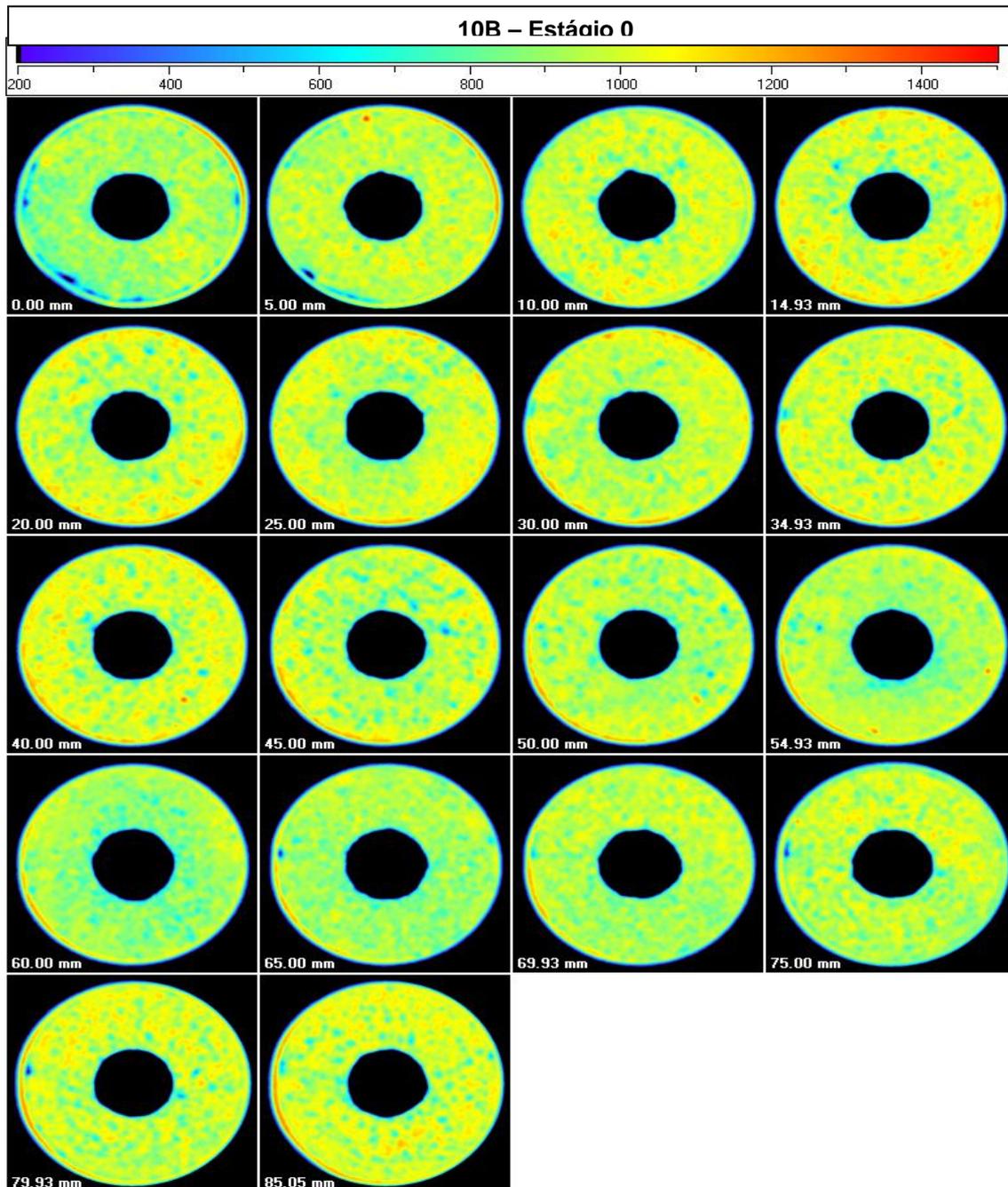


Figura 4.23 – Seções transversais do corpo de prova 10B com pressão confinante nula.

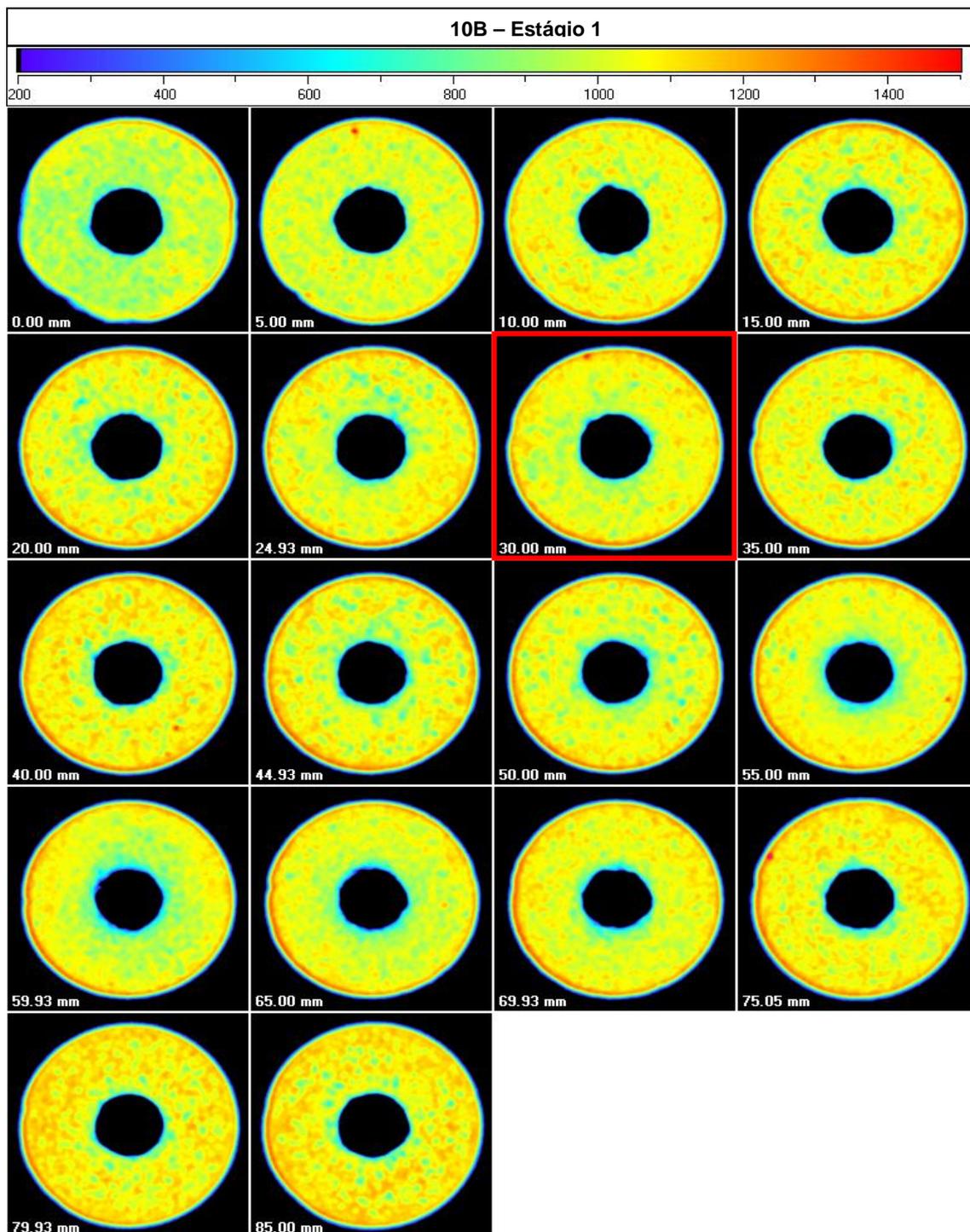


Figura 4.24 – Seções transversais do corpo de prova 10B com pressão confinante 18Mpa. Nota-se na seção 30,00mm o início do breakout. É visto um enfraquecimento do material ao redor da cavidade circular. A sua densidade diminui.

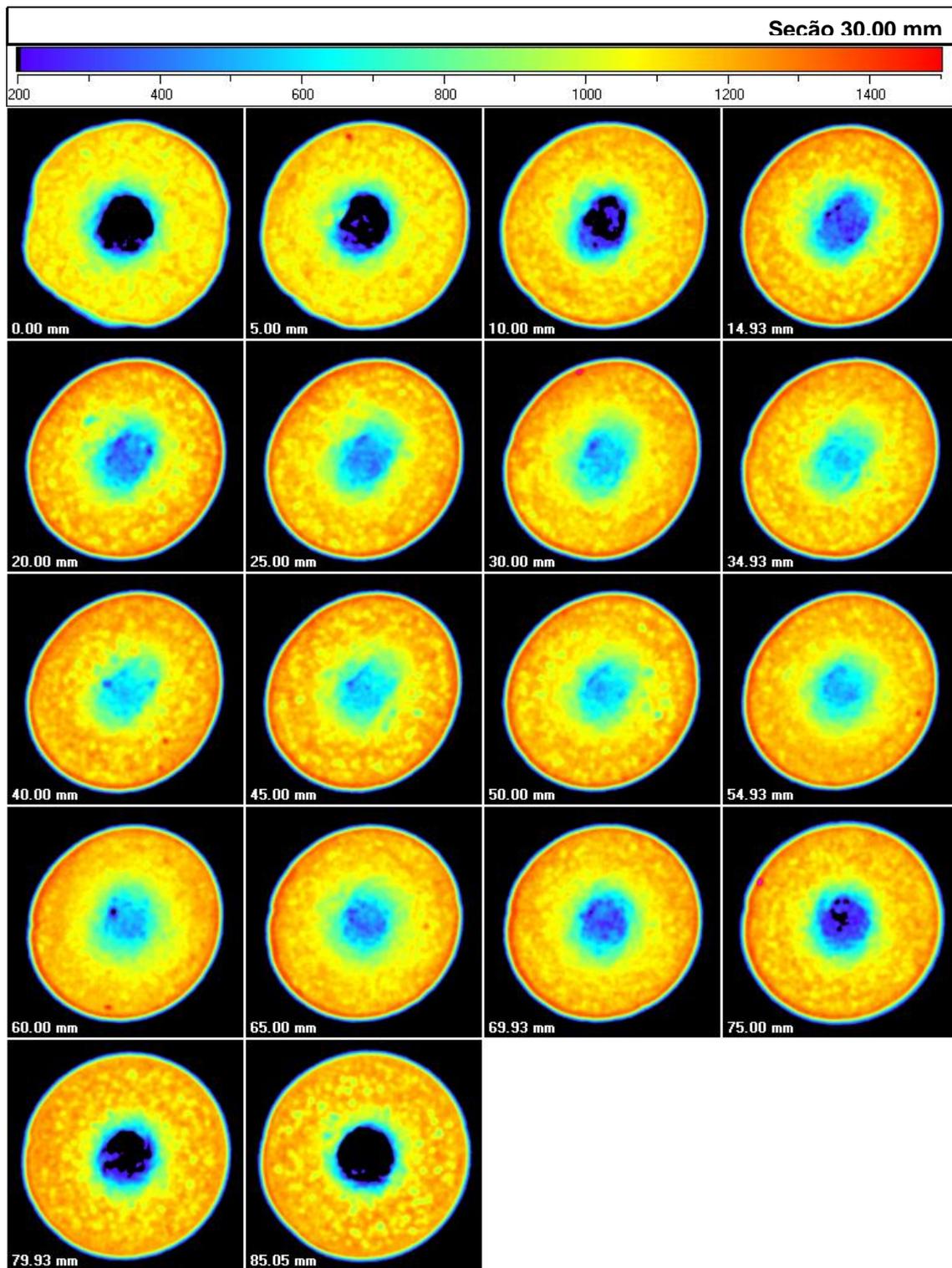
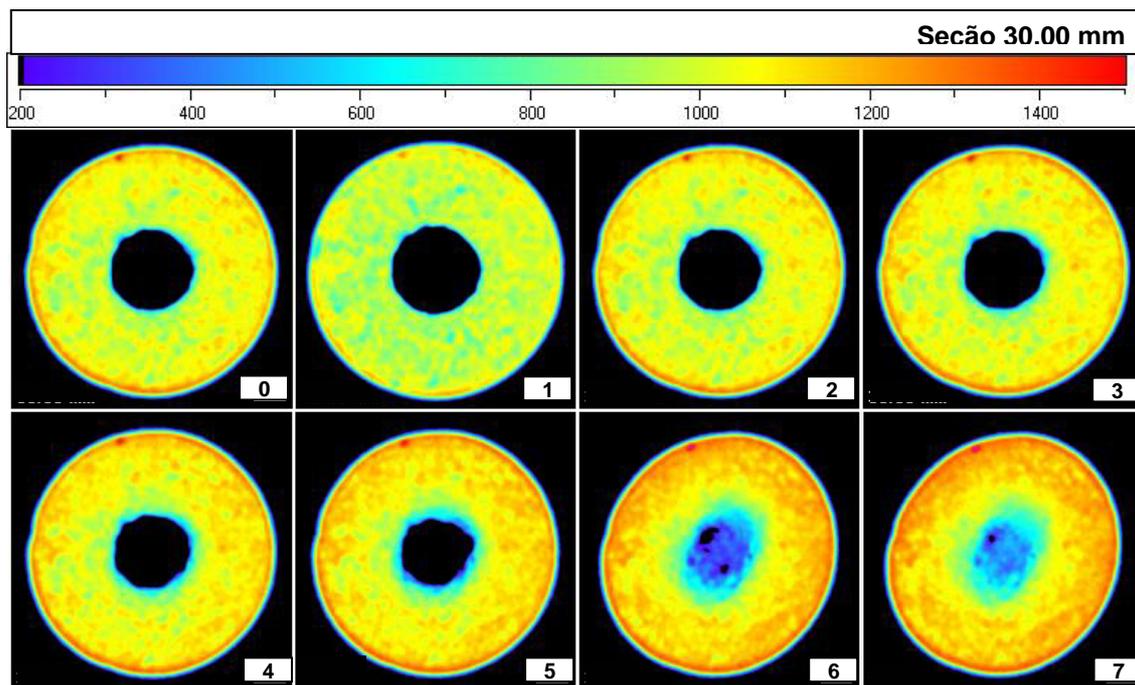


Figura 4.25 – Seções transversais do corpo de prova 10B com pressão confinante 40Mpa. No fim do ensaio, as cavidades são praticamente todas preenchidas. Também foi verificado um aumento da densidade das seções de acordo com o aumento do carregamento.



4.26 – Seqüência da formação de breakout na seção 30,00 mm do estágio 0 ao estágio 7.

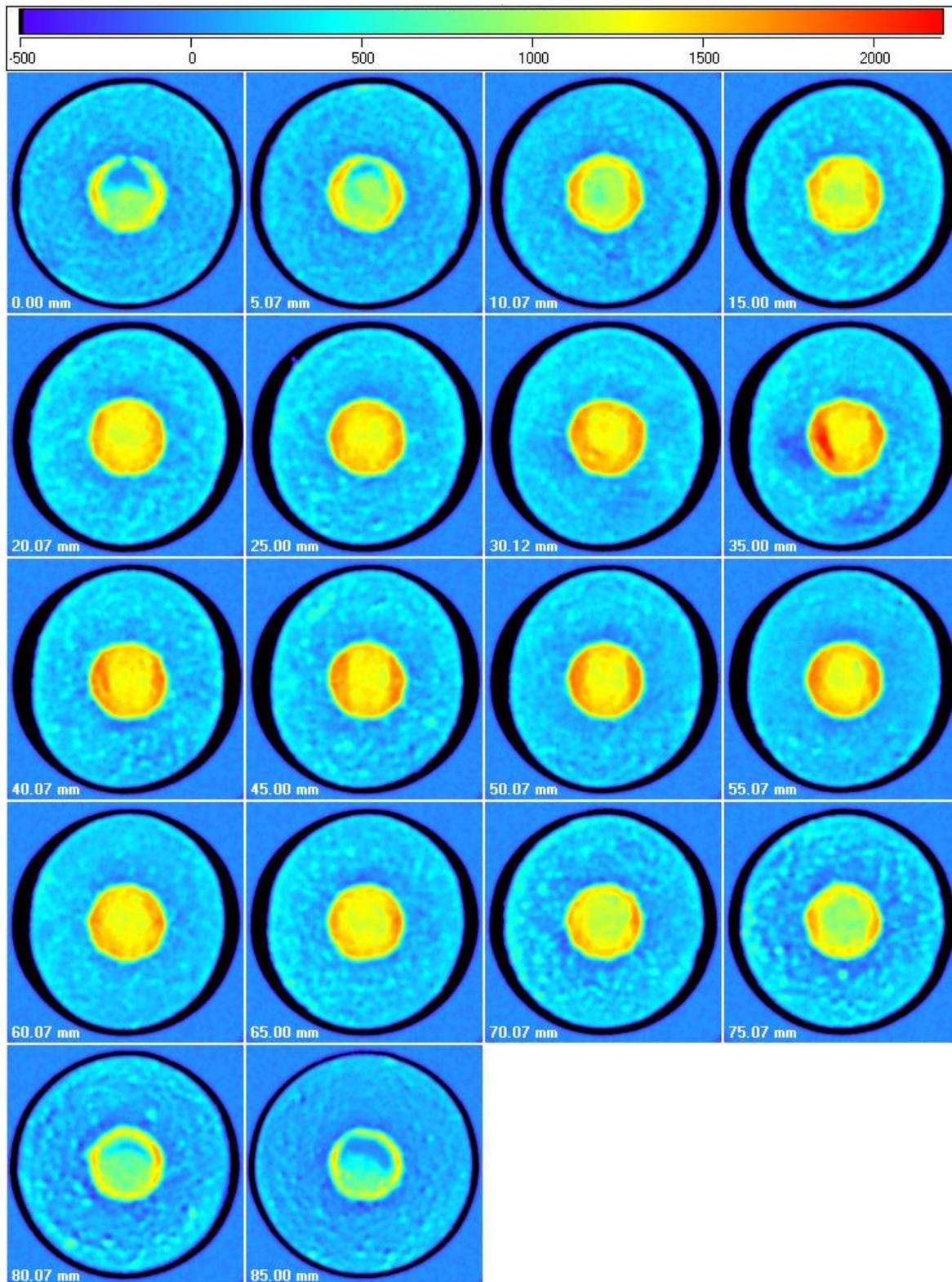


Figura 4.27 – Subtração de imagens do corpo de prova 10B no estágio 0 menos o estágio 7. Nota-se o preenchimento de praticamente todas as cavidade interna por material granular.

Tabela 4.06 – Estimativa da área de breakout e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova 10B.

Seção	Posição absoluta [mm]	Área Invasada [%]	Área Invasada [Pixel ²]	Área Invasada [mm ²]	Massa de areia (g)
1	1701,5	0,172121	1136	568	7,5
2	1706,5	0,164848	1088	544	7,2
3	1711,5	0,182727	1206	603	8,0
4	1716,43	0,225606	1489	744,5	9,9
5	1721,5	0,214848	1418	709	9,4
6	1726,5	0,198182	1308	654	8,7
7	1731,5	0,193485	1277	638,5	8,5
8	1736,43	0,17	1122	561	7,4
9	1741,5	0,170909	1128	564	7,5
10	1746,5	0,17803	1175	587,5	7,8
11	1751,5	0,180455	1191	595,5	7,9
12	1756,43	0,174848	1154	577	7,6
13	1761,5	0,199848	1319	659,5	8,7
14	1766,5	0,206364	1362	681	9,0
15	1771,43	0,200909	1326	663	8,8
16	1776,5	0,198182	1308	654	8,7
17	1781,43	0,166061	1096	548	7,3
18	1786,55	0,128788	850	425	5,6
				Total de areia (g)	145,4

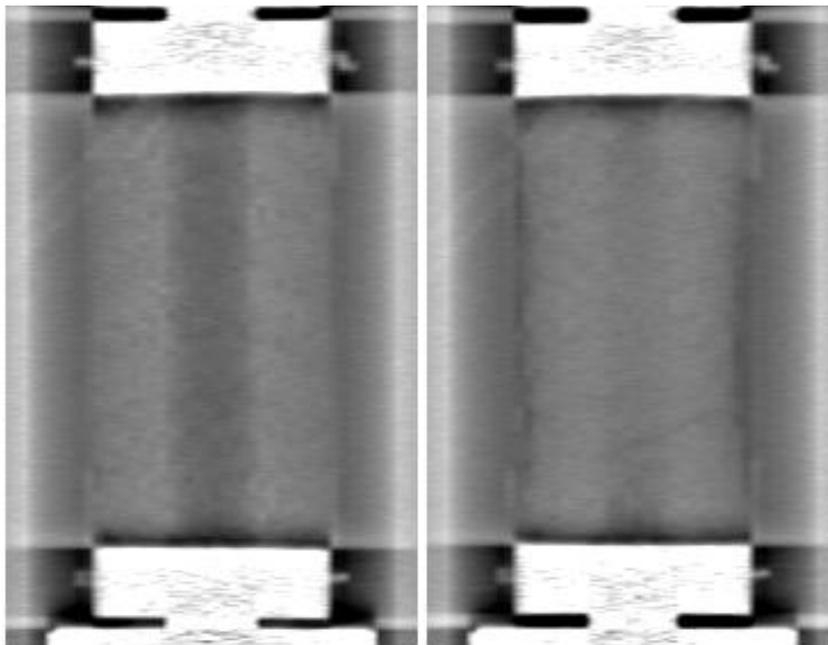


Figura 4.28 – Imagens Pilotos antes e após o ensaio.



Figura 4.29 – Corpo de prova 10B após o ensaio. Nota-se o preenchimento de praticamente toda a cavidade interna.

CORPO DE PROVA 8B

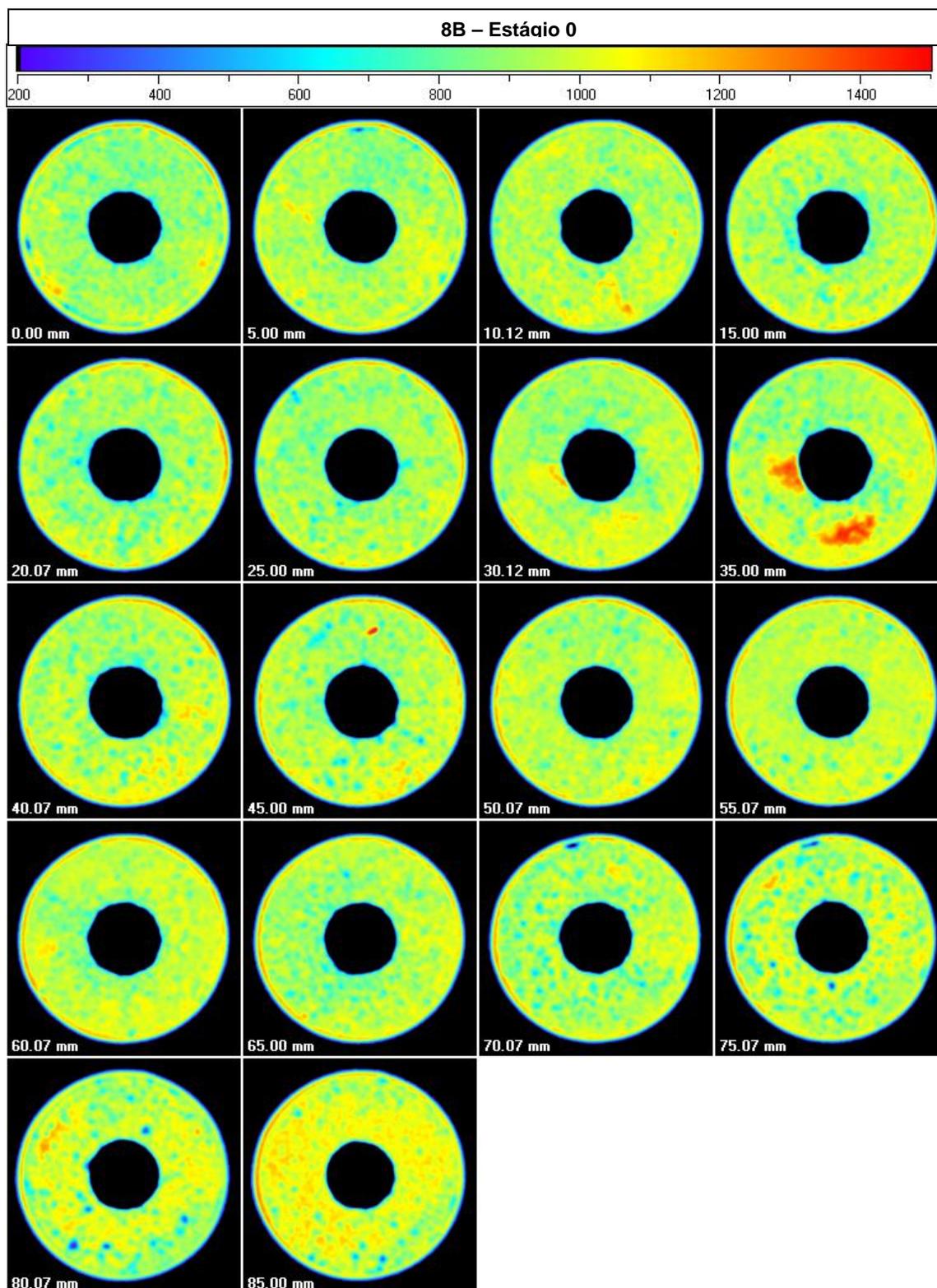


Figura 4.30 – Seções transversais do corpo de prova 8B com pressão confinante nula.

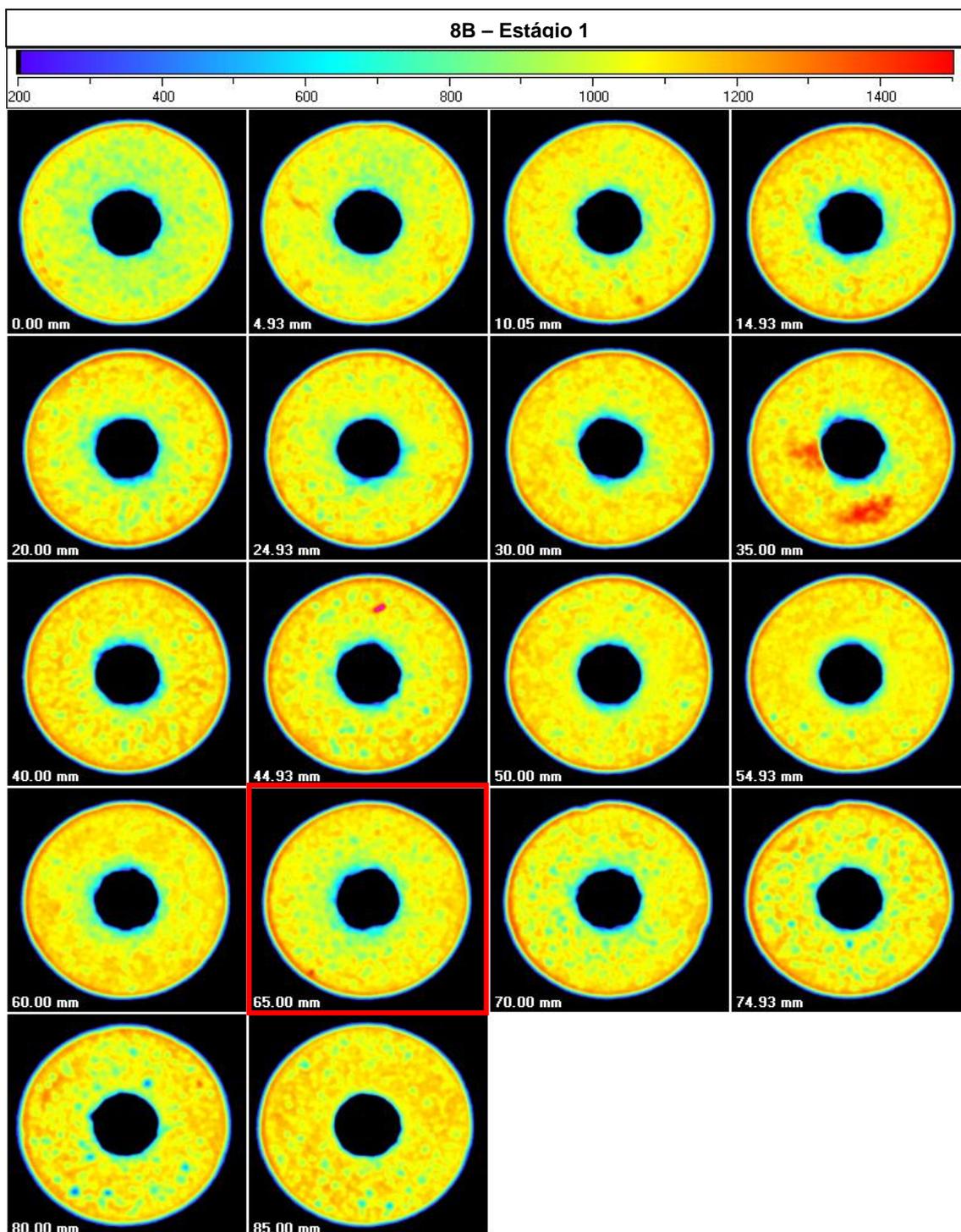


Figura 4.31 – Seções transversais do corpo de prova 8B com pressão confinante 18 Mpa. Nota-se na seção 65,00 mm o início do breakout. É visto um enfraquecimento do material ao redor da cavidade circular. A sua densidade diminui.

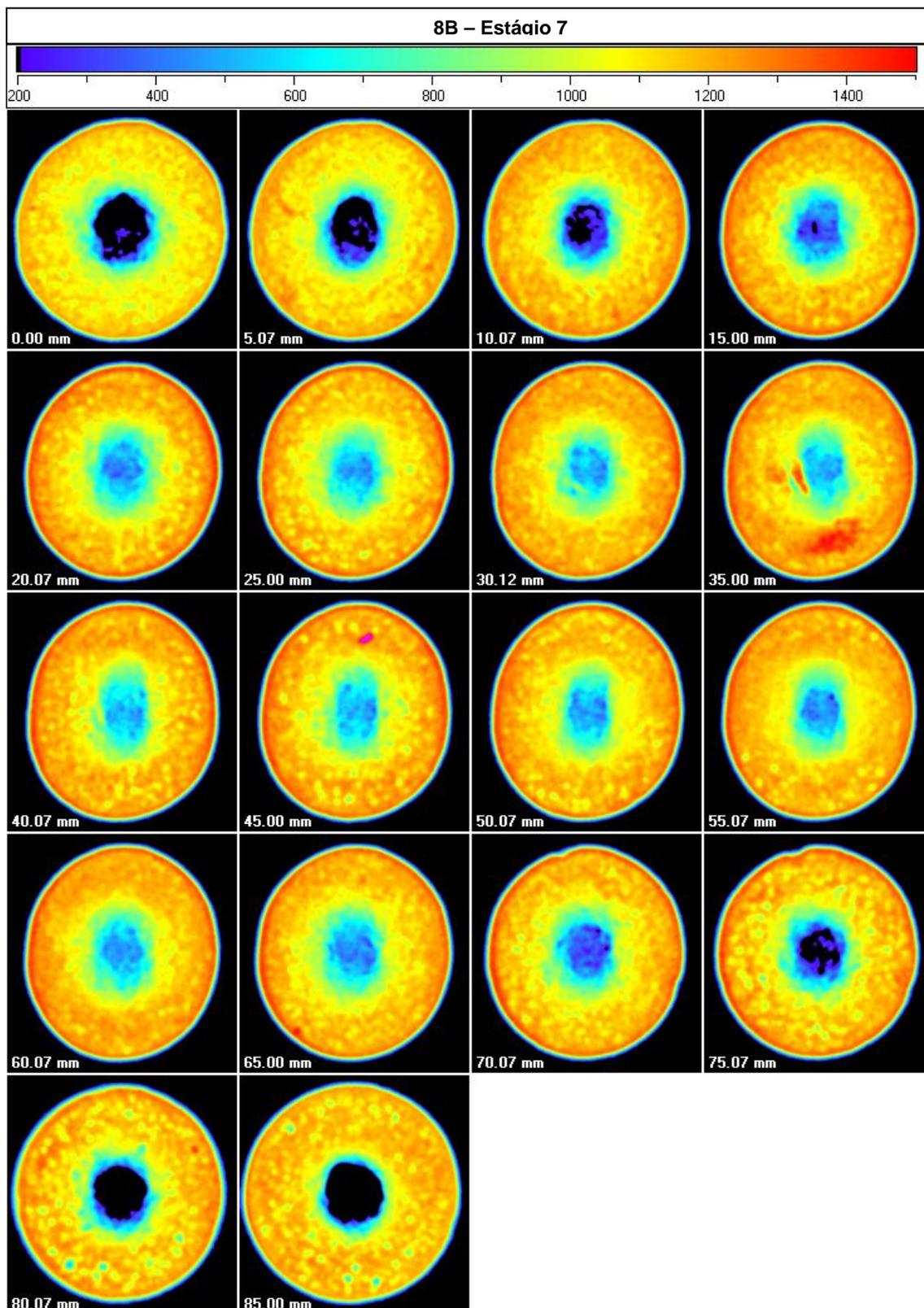
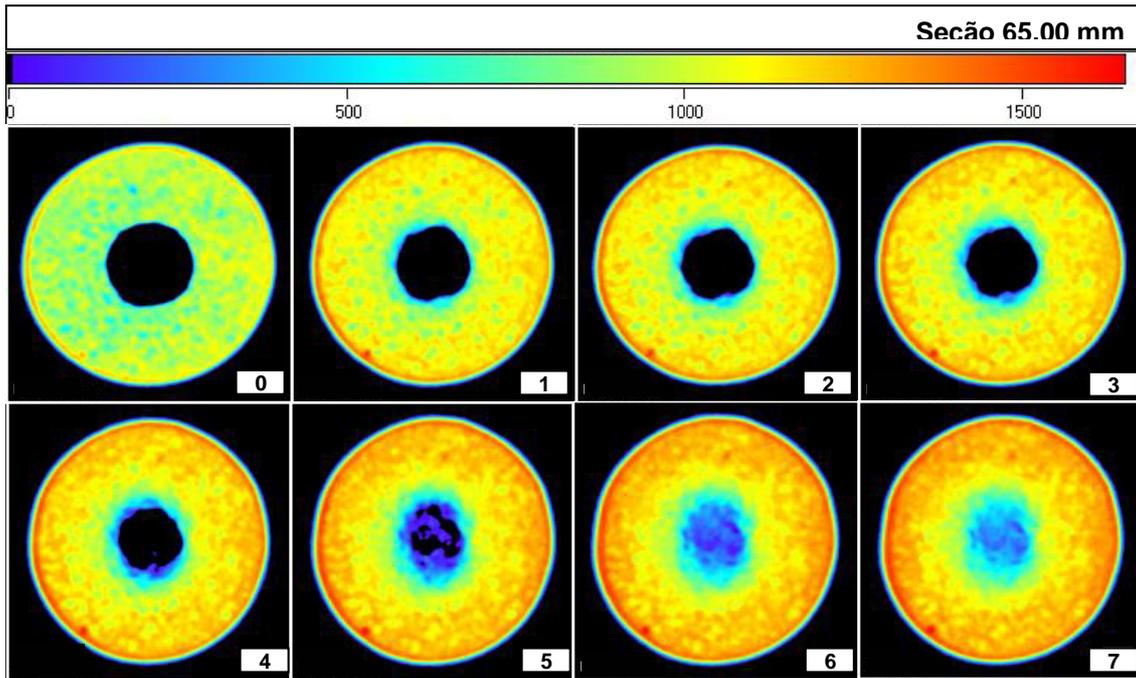


Figura 4.32 – Seções transversais do corpo de prova 8B com pressão confinante 40Mpa. Também foi verificado um aumento da densidade das seções de acordo com o aumento do carregamento.



4.33 – Seqüência da formação de breakout na seção 65,00 mm do estágio 0 ao estágio 7.

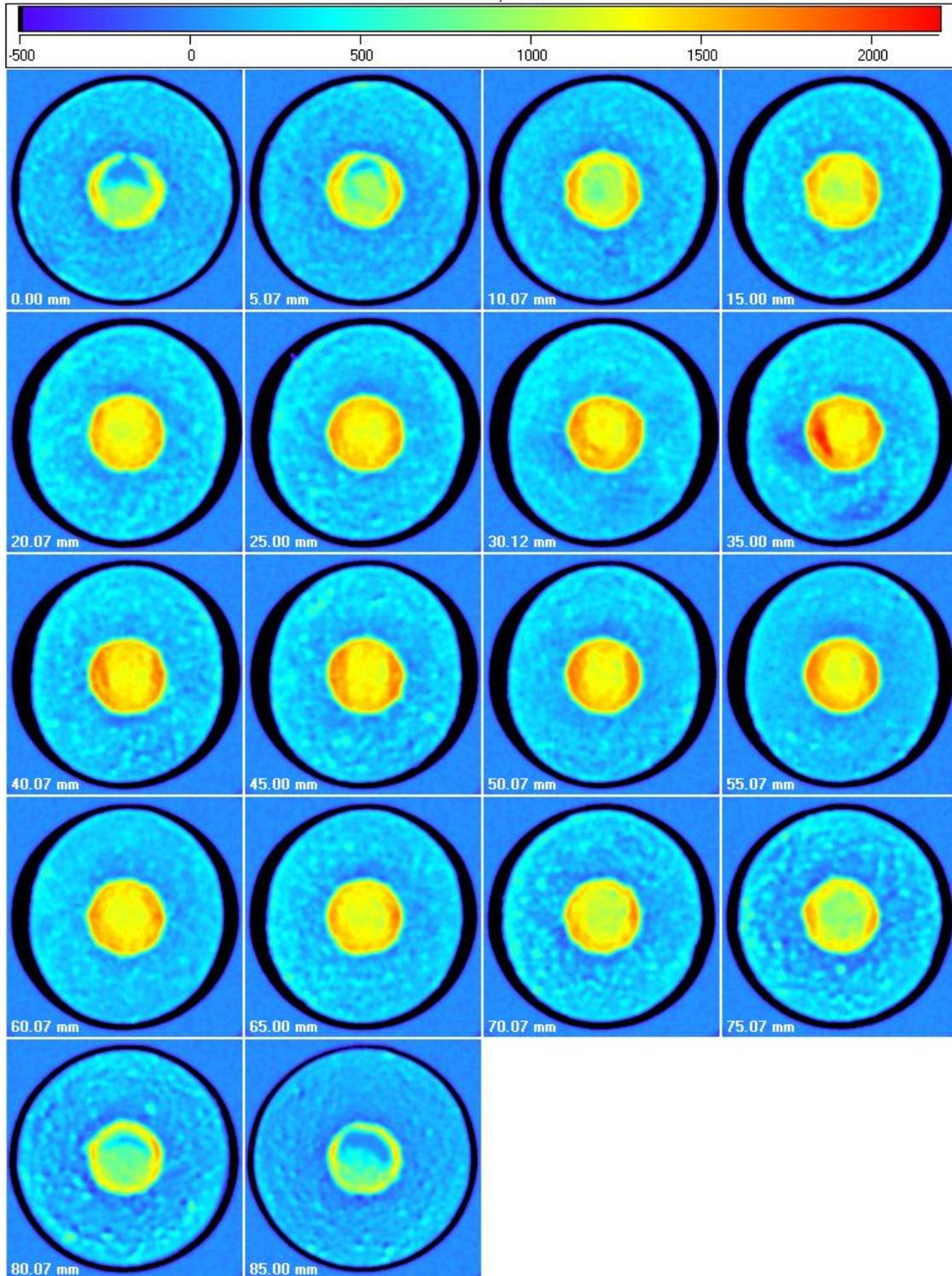


Figura 4.34 – Subtração de imagens do corpo de prova 8B no estágio 0 menos o estágio 7. Nota-se o preenchimento de praticamente todas as cavidades interna por material granular.

Tabela 4.07 – Estimativa da área de breakout e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova 8B.

Seção	Posição absoluta [mm]	Área Invasada [fr]	Área Invasada [Pixel ²]	Área Invasada [mm ²]	Massa de areia (g)
1	1700,93	0,260649	1848	924	12,2
2	1706	0,222003	1574	787	10,4
3	1711	0,21354	1514	757	10,0
4	1715,93	0,232722	1650	825	10,9
5	1721	0,244429	1733	866,5	11,5
6	1725,93	0,22708	1610	805	10,7
7	1731,05	0,198872	1410	705	9,3
8	1735,93	0,174471	1237	618,5	8,2
9	1741	0,195346	1385	692,5	9,2
10	1745,93	0,21354	1514	757	10,0
11	1751	0,188434	1336	668	8,9
12	1756	0,180959	1283	641,5	8,5
13	1761	0,219323	1555	777,5	10,3
14	1765,93	0,23921	1696	848	11,2
15	1771	0,247532	1755	877,5	11,6
16	1776	0,23385	1658	829	11,0
17	1781	0,196615	1394	697	9,2
18	1785,93	0,133427	946	473	6,3
				Total de areia (g)	179,5

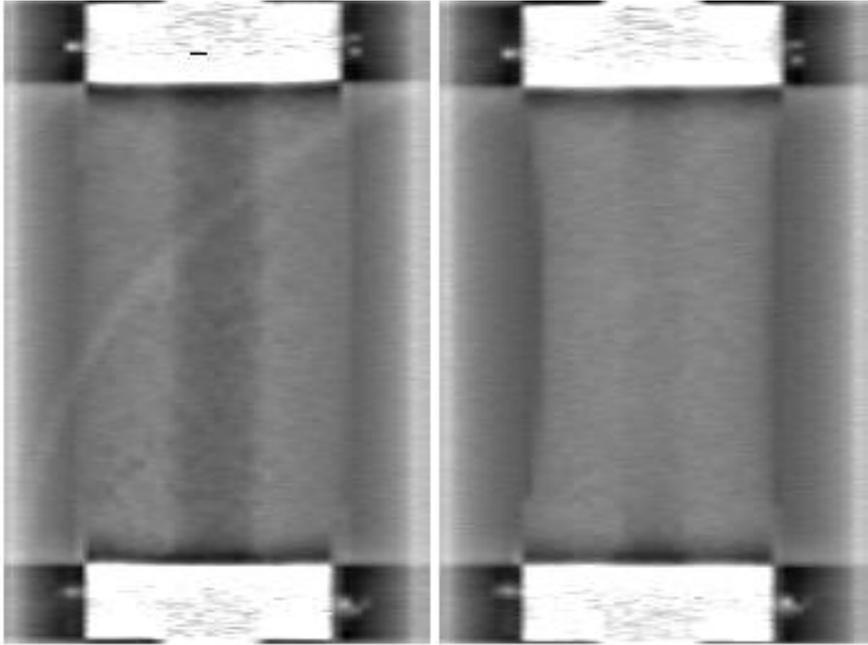


Figura 4.35 – Imagens Pilotos antes e após o ensaio.



Figura 4.36 – Corpo de prova 8B após o ensaio. Nota-se o preenchimento de praticamente toda a cavidade interna.

CORPO DE PROVA 3B

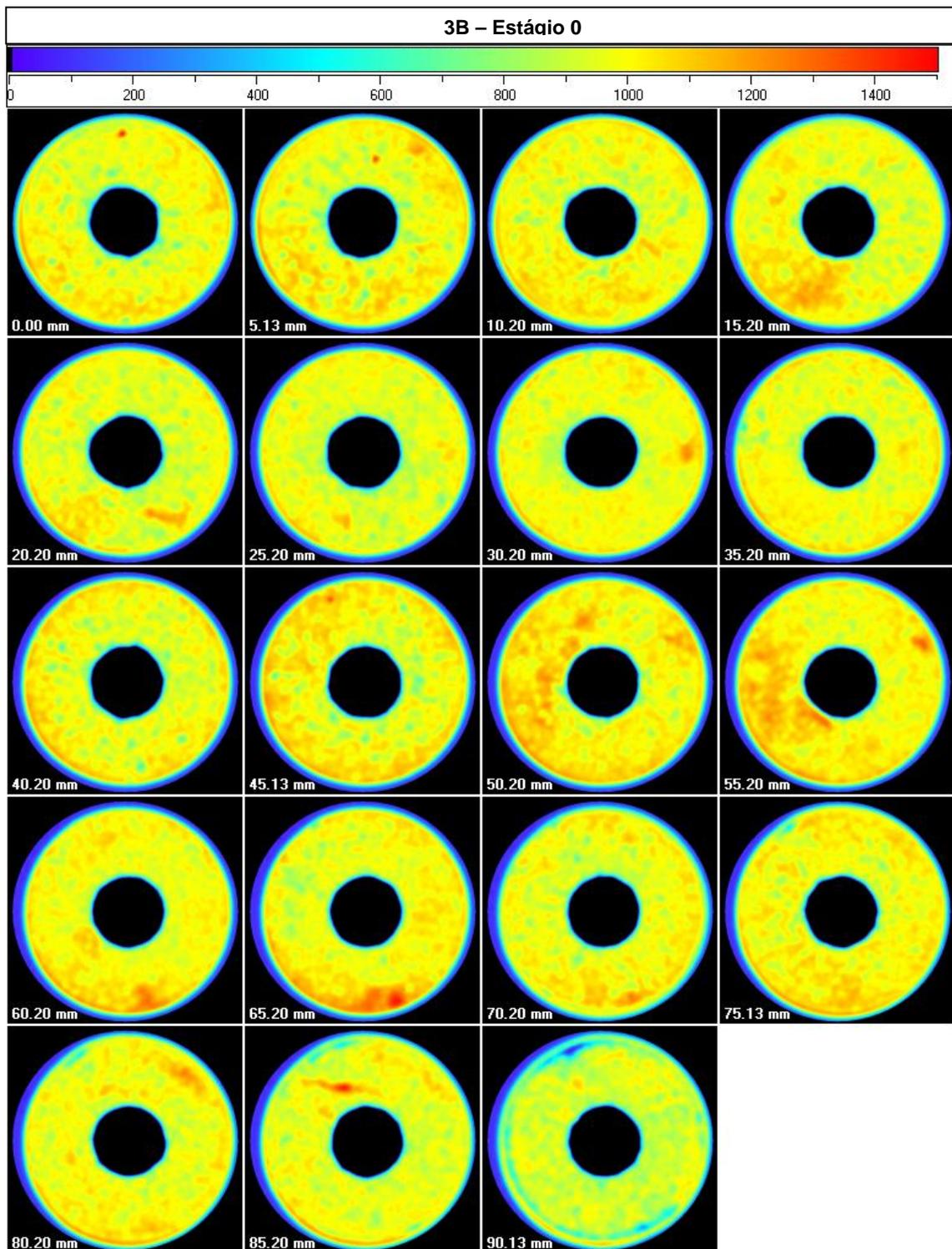


Figura 4.37 – Seções transversais do corpo de prova 3B com pressão confinante nula.

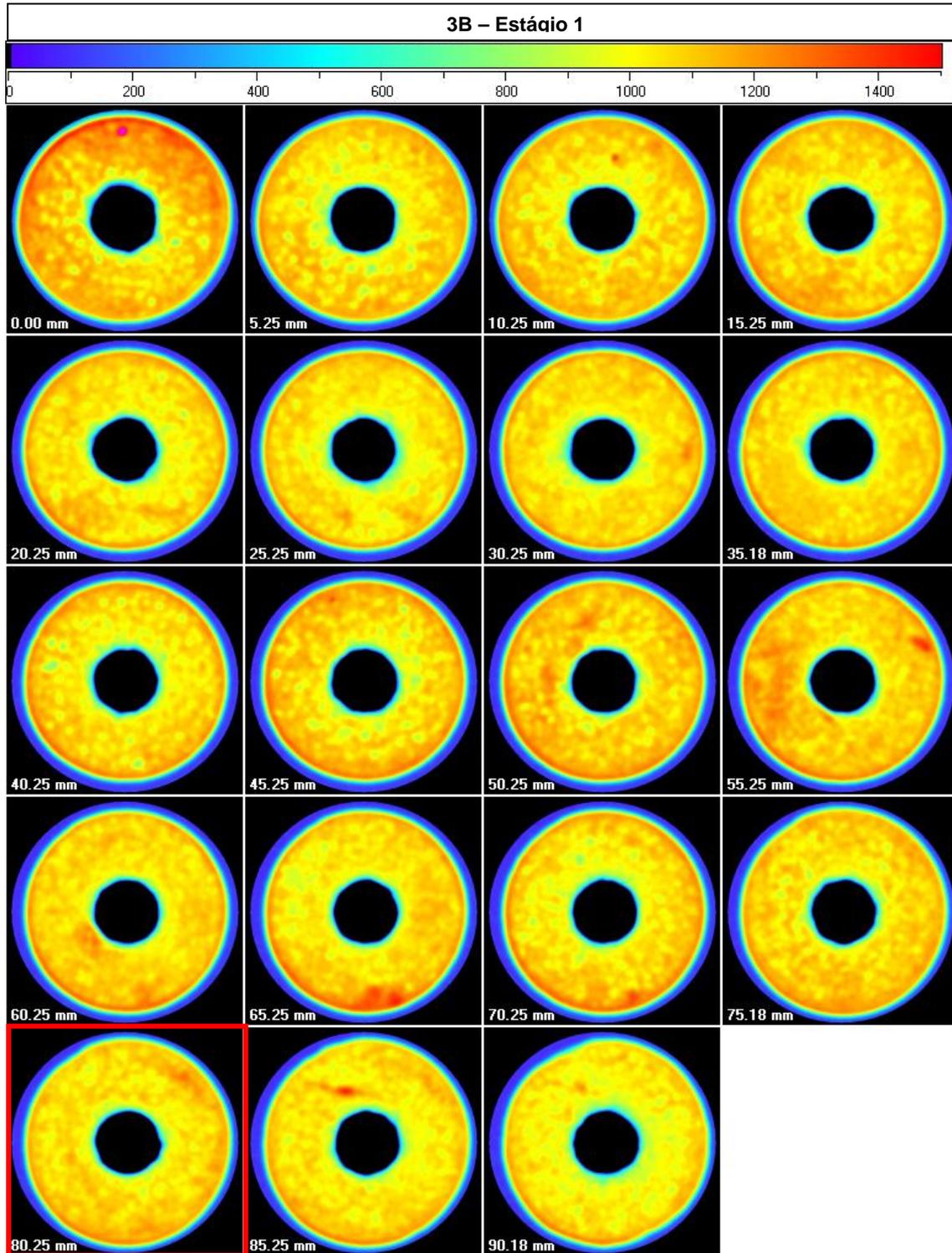


Figura 4.38 – Seções transversais do corpo de prova 3B com pressão confinante 19,6 Mpa. Nota-se na seção 80,25mm o início do breakout.

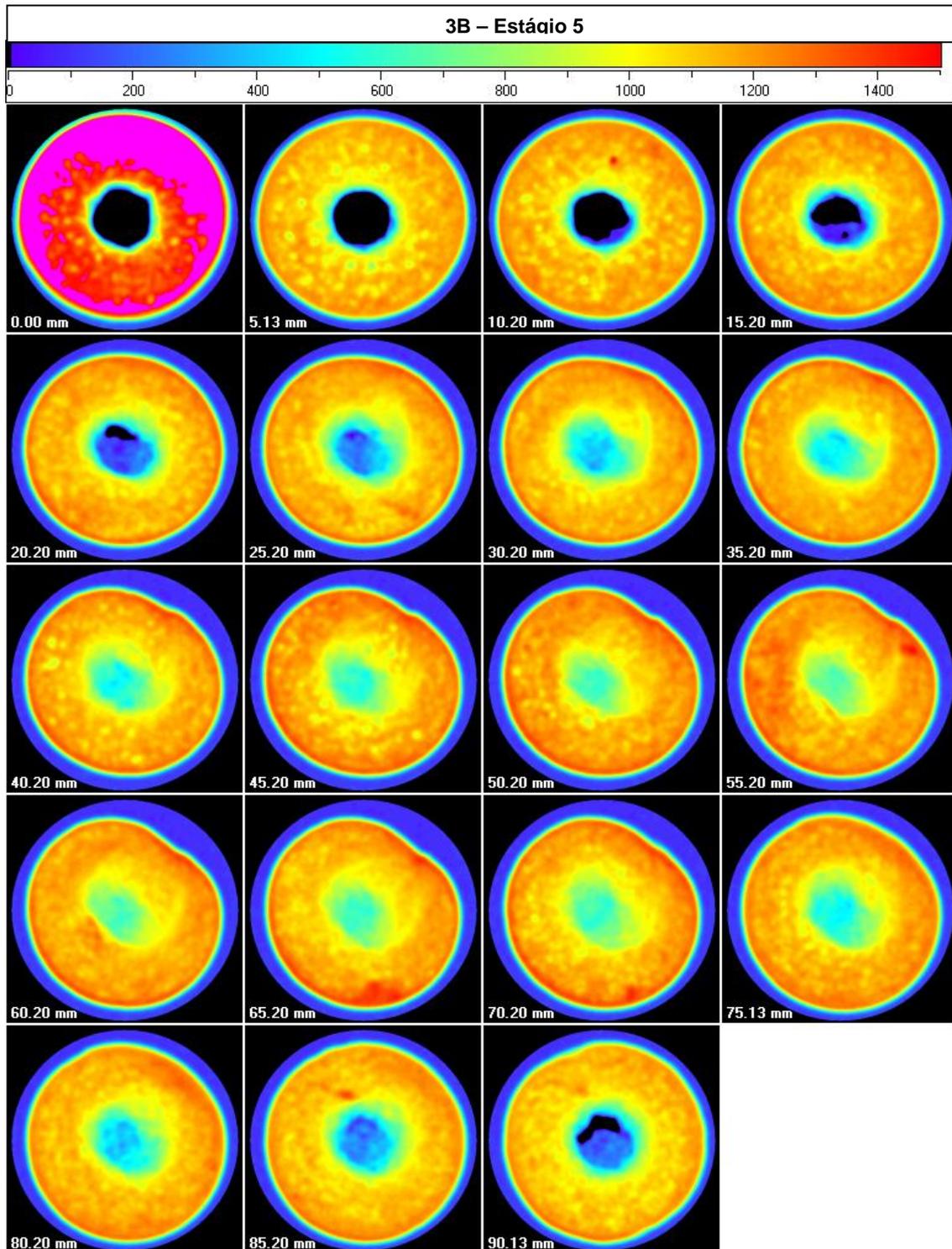


Figura 4.39 – Seções transversais do corpo de prova 3B com pressão confinante 40Mpa. Também foi verificado um aumento da densidade das seções de acordo com o aumento do carregamento. Com a compressão da amostra, o pistão aparece na primeira seção, aumentando a densidade da imagem tomográfica.

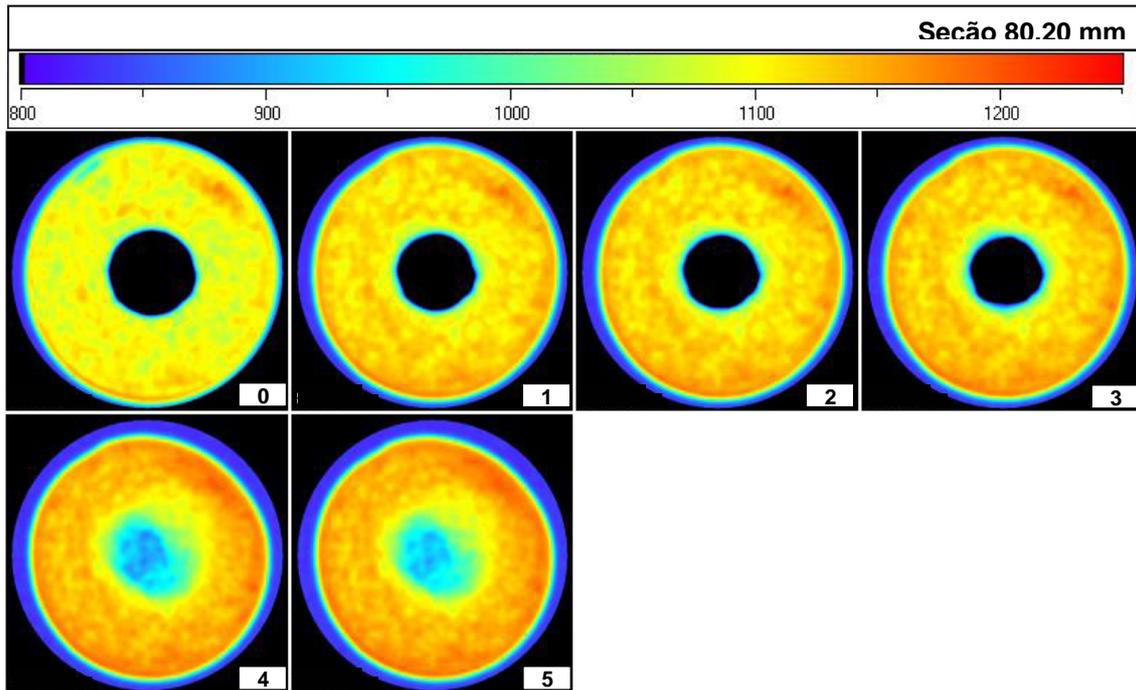


Figura 4.40 – Seqüência da formação de breakout na seção 80,20 mm do estágio 0 ao estágio 5.

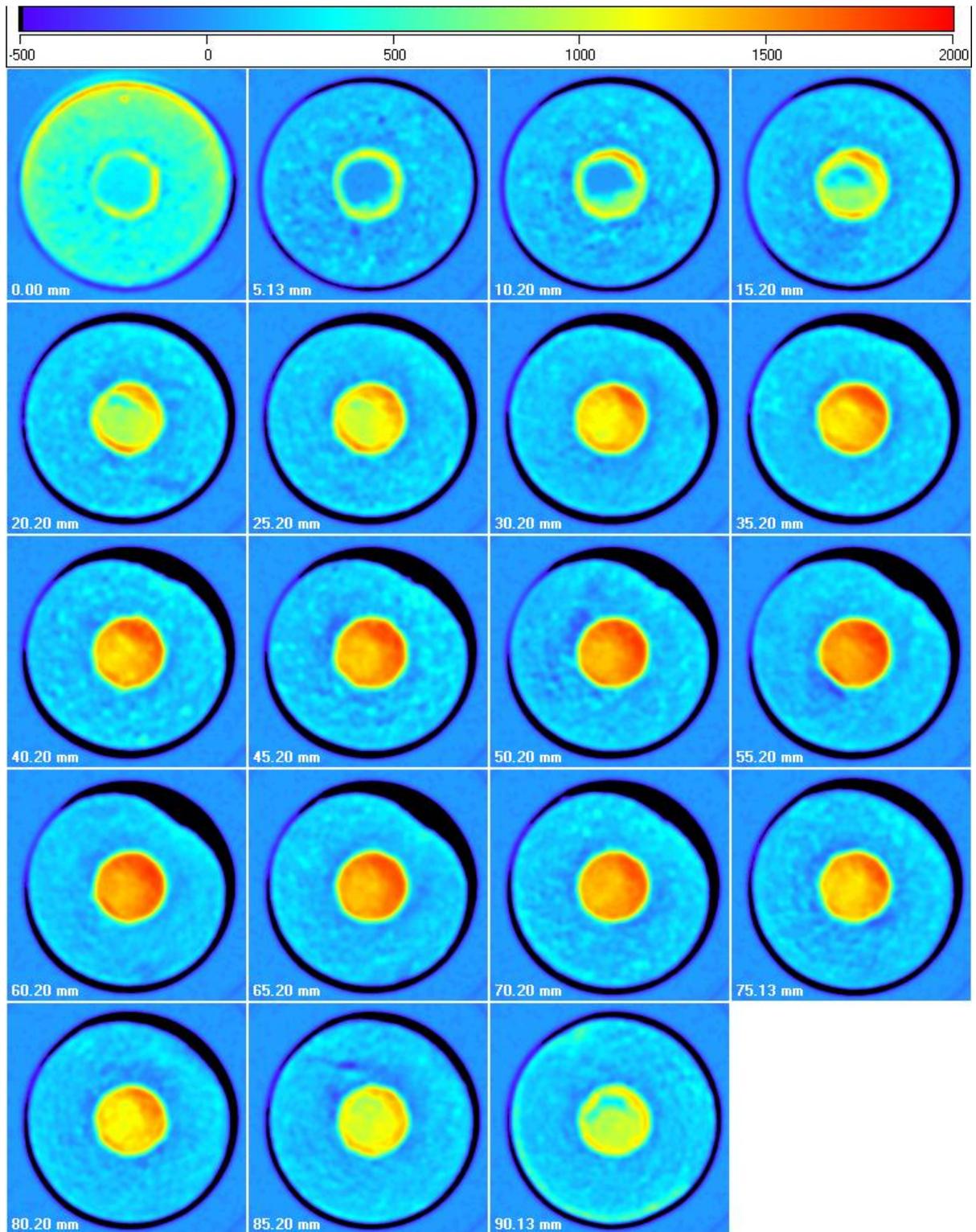


Figura 4.41 – Subtração de imagens do corpo de prova 3B no estágio 0 menos o estágio 5. Nota-se o preenchimento de praticamente todas as cavidades interna por material granular.

Tabela 4.08 – Estimativa da área de breakout e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova 3B.

Seção	Posição absoluta [mm]	Área Invasada (%)	Área Invasada [Pixel ²]	Área Invasada [mm ²]	Massa de areia (g)
1	5,13	0,153352	979	489,5	6,5
2	10,2001	0,144267	921	460,5	6,1
3	15,2001	0,177945	1136	568	7,5
4	20,2001	0,224154	1431	715,5	9,5
5	25,2001	0,266604	1702	851	11,3
6	30,2001	0,242638	1549	774,5	10,3
7	35,2001	0,20849	1331	665,5	8,8
8	40,2001	0,20849	1331	665,5	8,8
9	45,2001	0,18844	1203	601,5	8,0
10	50,2001	0,159774	1020	510	6,8
11	55,2001	0,14411	920	460	6,1
12	60,2001	0,148966	951	475,5	6,3
13	65,2001	0,173559	1108	554	7,3
14	70,2001	0,214442	1369	684,5	9,1
15	75,13	0,230107	1469	734,5	9,7
16	80,2001	0,249373	1592	796	10,5
17	85,2001	0,265508	1695	847,5	11,2
18	90,13	0,253916	1621	810,5	10,7
				Total de areia (g)	154,5



Figura 4.42 – Corpo de prova 3B após o ensaio. Nota-se o preenchimento de praticamente toda a cavidade interna.

Tabela 4.09 – Características dos corpos de prova

Corpo de prova	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Altura (mm)	Tipo de Arenito
S - 1	45,44	14,87	83	Sergi
S - 2	45	15	83	Sergi

Para estes corpos de prova foram feitas aquisições de imagens em tempo real, durante a aplicação da pressão confinante através do Pressurizador com rampa contínua e gradativa de 0 a 40MPa em torno de 56 minutos com um controle de taxa de 0,01 bar/seg para o corpo de prova S-1 e 0,05 bar/seg para o Corpo de prova S-2.

A imagem da subtração de imagens do estágio 0 e do último estágio para o corpos de prova S-1 não foi feito devido ao seu colapso global.

CORPO DE PROVA S-1

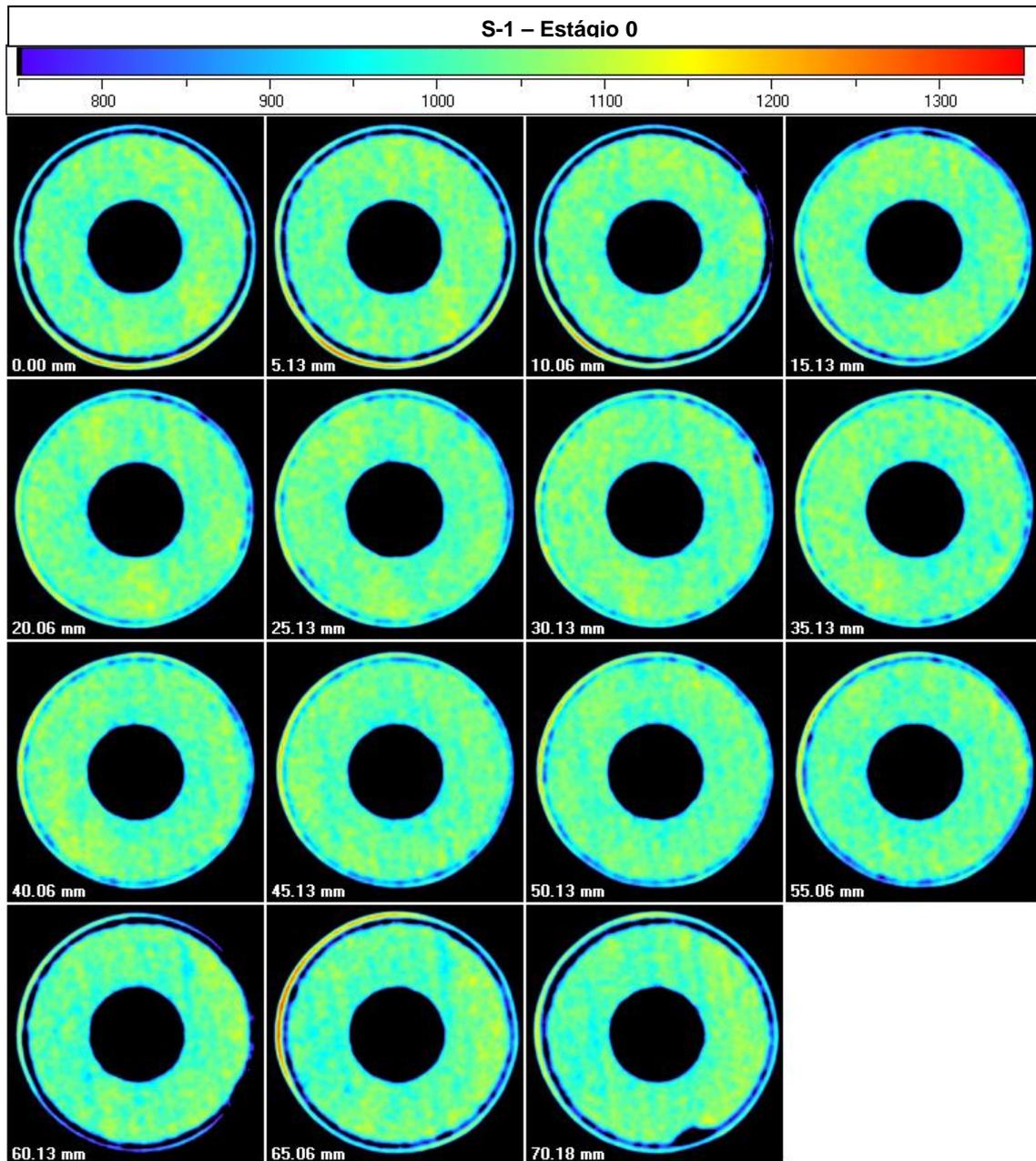


Figura 4.43 – Seções transversais do corpo de prova S-1 com pressão confinante nula.

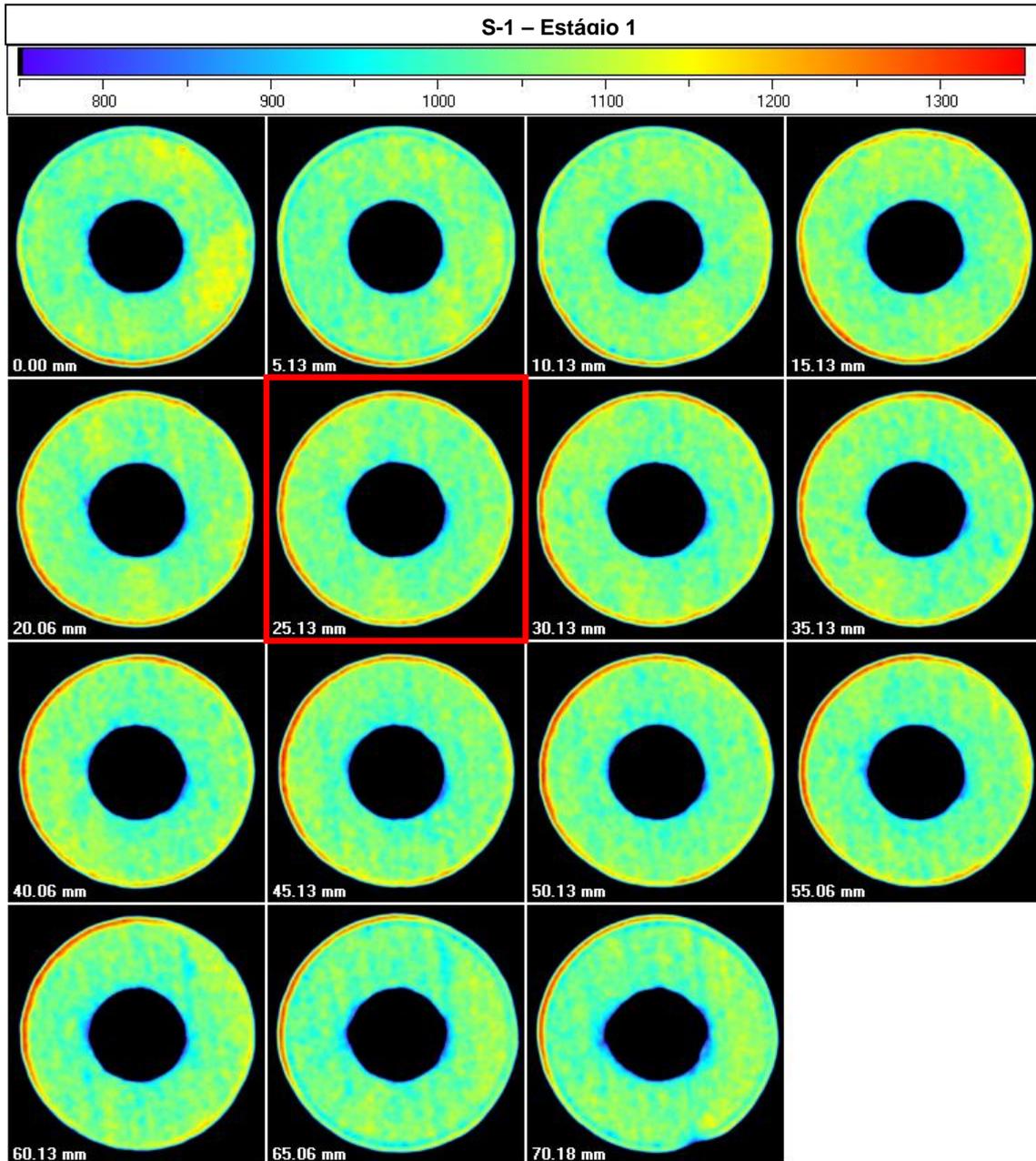


Figura 4.44 – Seções transversais do corpo de prova S-1 com pressão confinante 2,6Mpa. Nota-se na seção 25,13mm o início do breakout. É visto um enfraquecimento do material ao redor da cavidade circular. A sua densidade diminui.

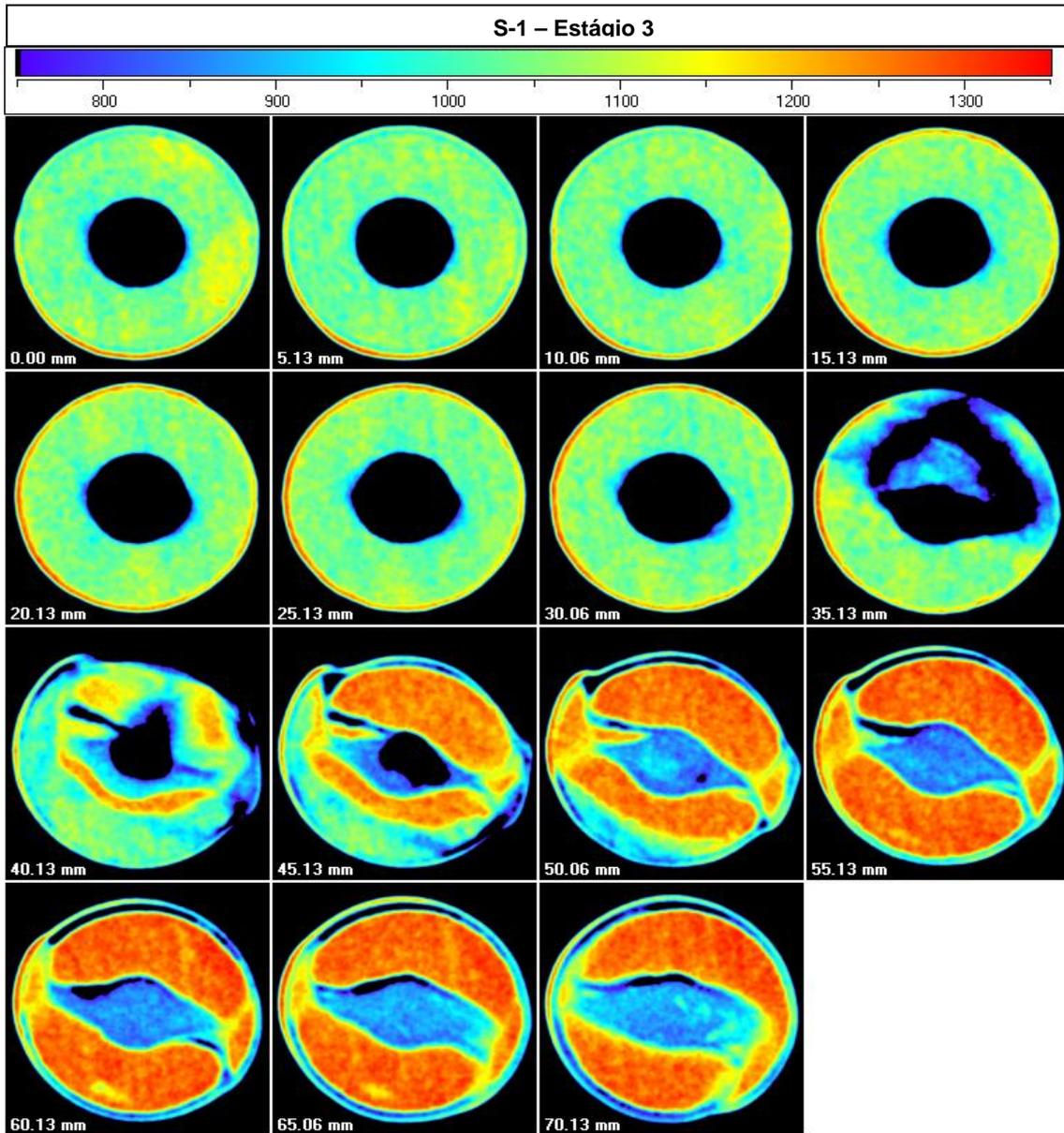


Figura 4.45 – Seções transversais do corpo de prova S-1 com pressão confinante 2,8Mpa. Na cavidade das seções, é observado o breakout com a forma em “V”. Nas últimas seções, ocorreu invasão do fluido devido ao rompimento da membrana, e com isso um aumento da densidade.

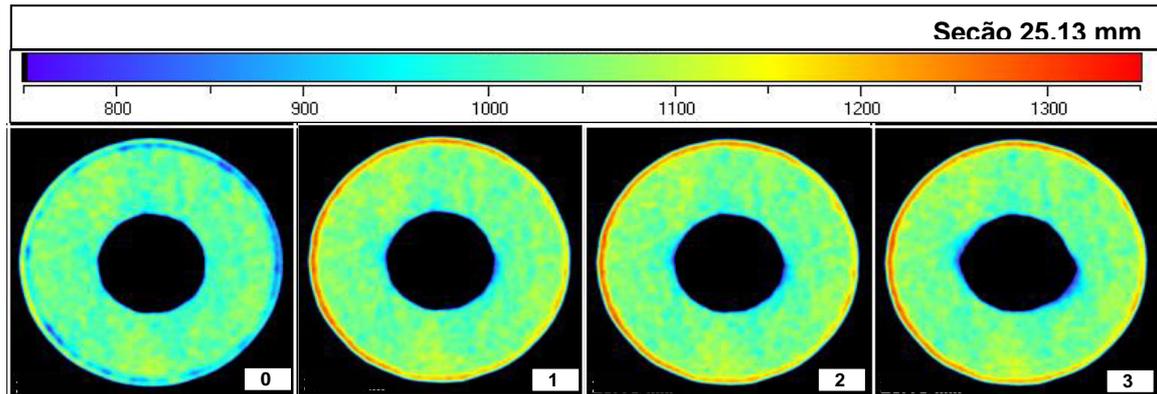


Figura 4.46 – Seqüência da formação de breakout na seção 25,13 mm do estágio 0 ao estágio 3.

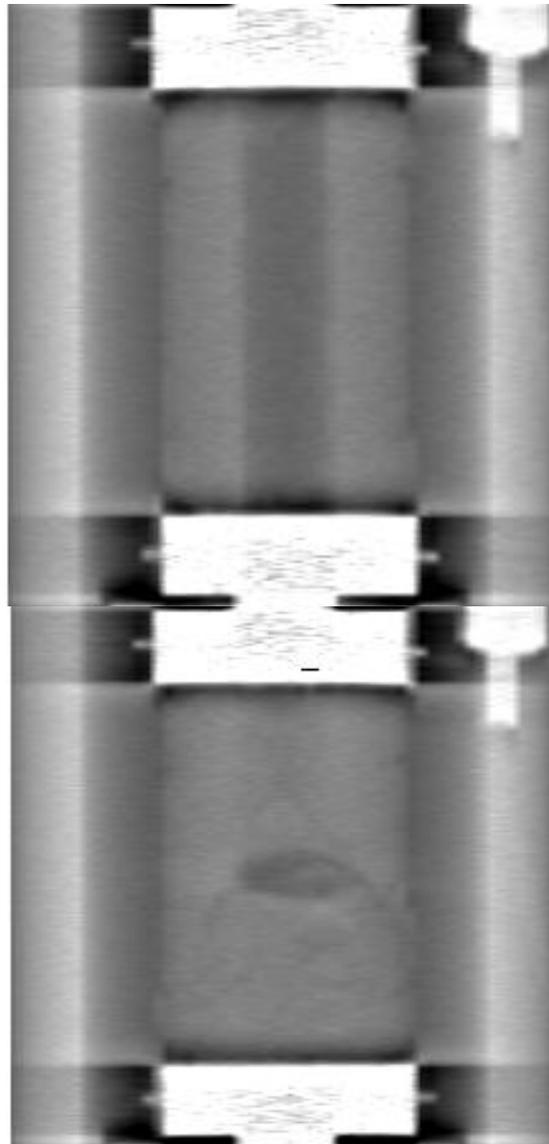


Figura 4.47 – Imagens Pilotos antes e após o ensaio. Com o colapso global, a membrna foi danificada permitindo que o óleo contaminasse a amostra.

CORPO DE PROVA S-2

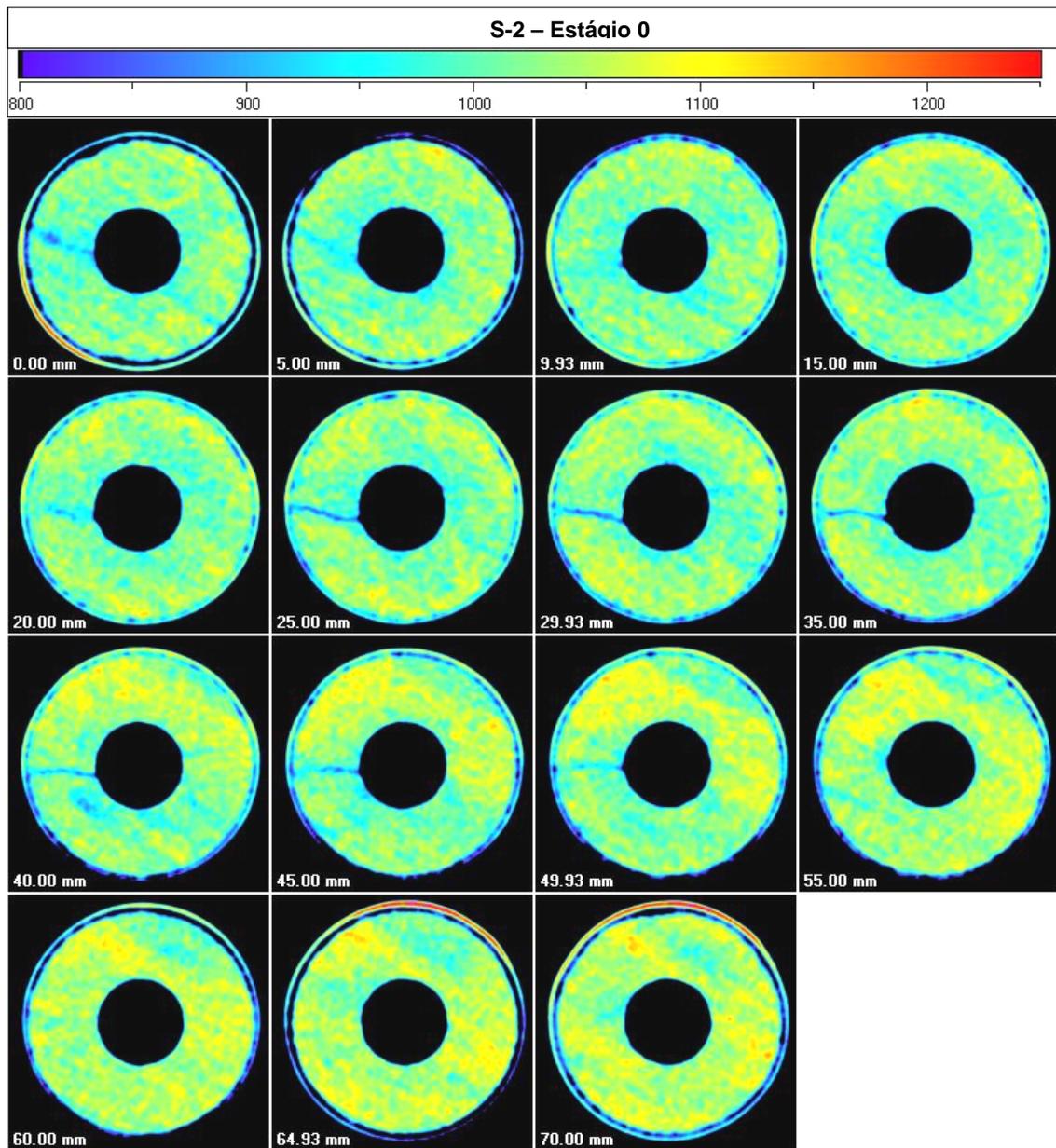


Figura 4.48 – Seções transversais do corpo de prova S-2 com pressão confinante nula.

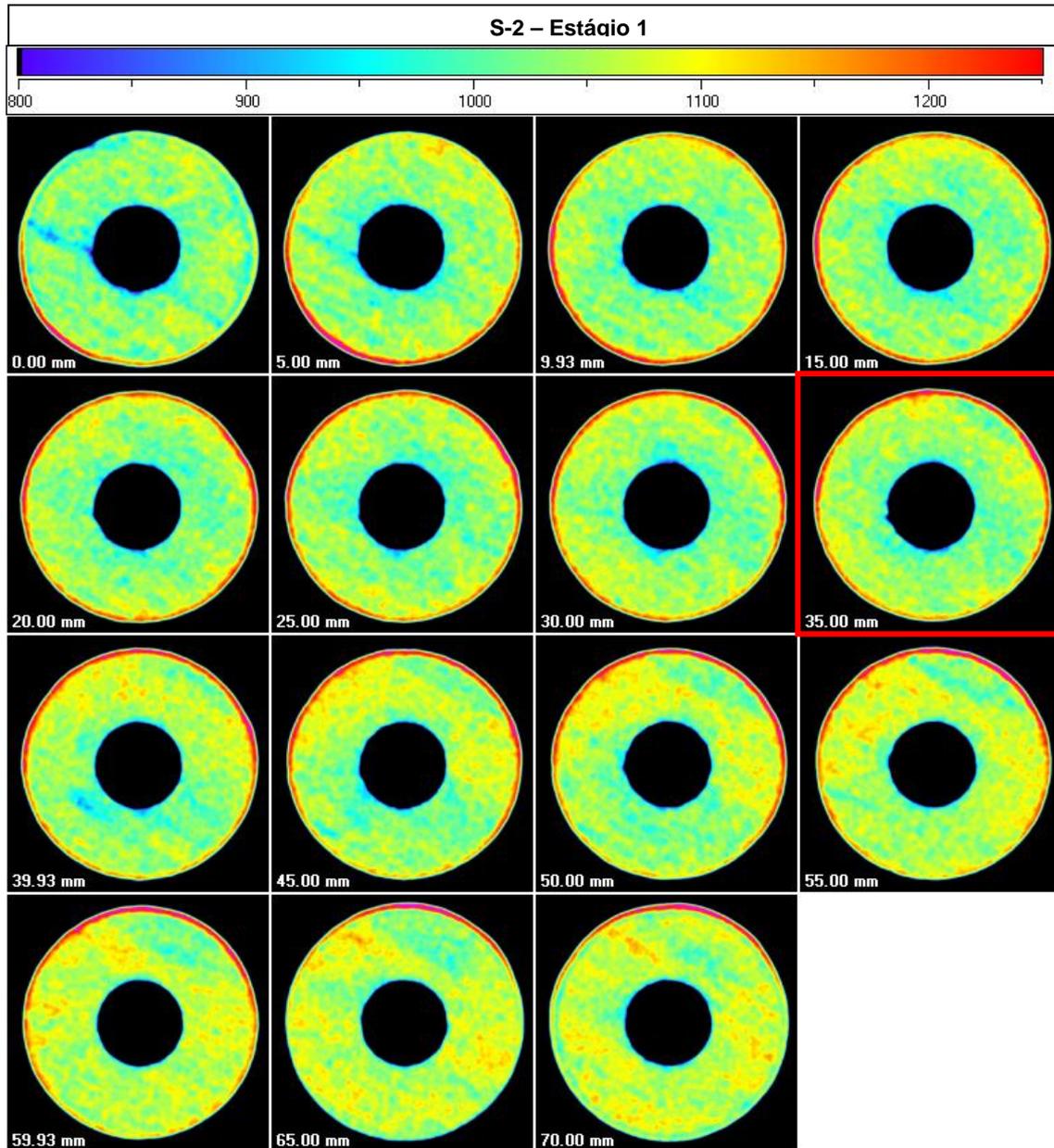


Figura 4.49 – Seções transversais do corpo de prova S-2 com pressão confinante 14,1Mpa. Nota-se na seção 35,00 mm o início do breakout. É visto um enfraquecimento do material ao redor da cavidade circular. A sua densidade diminui.

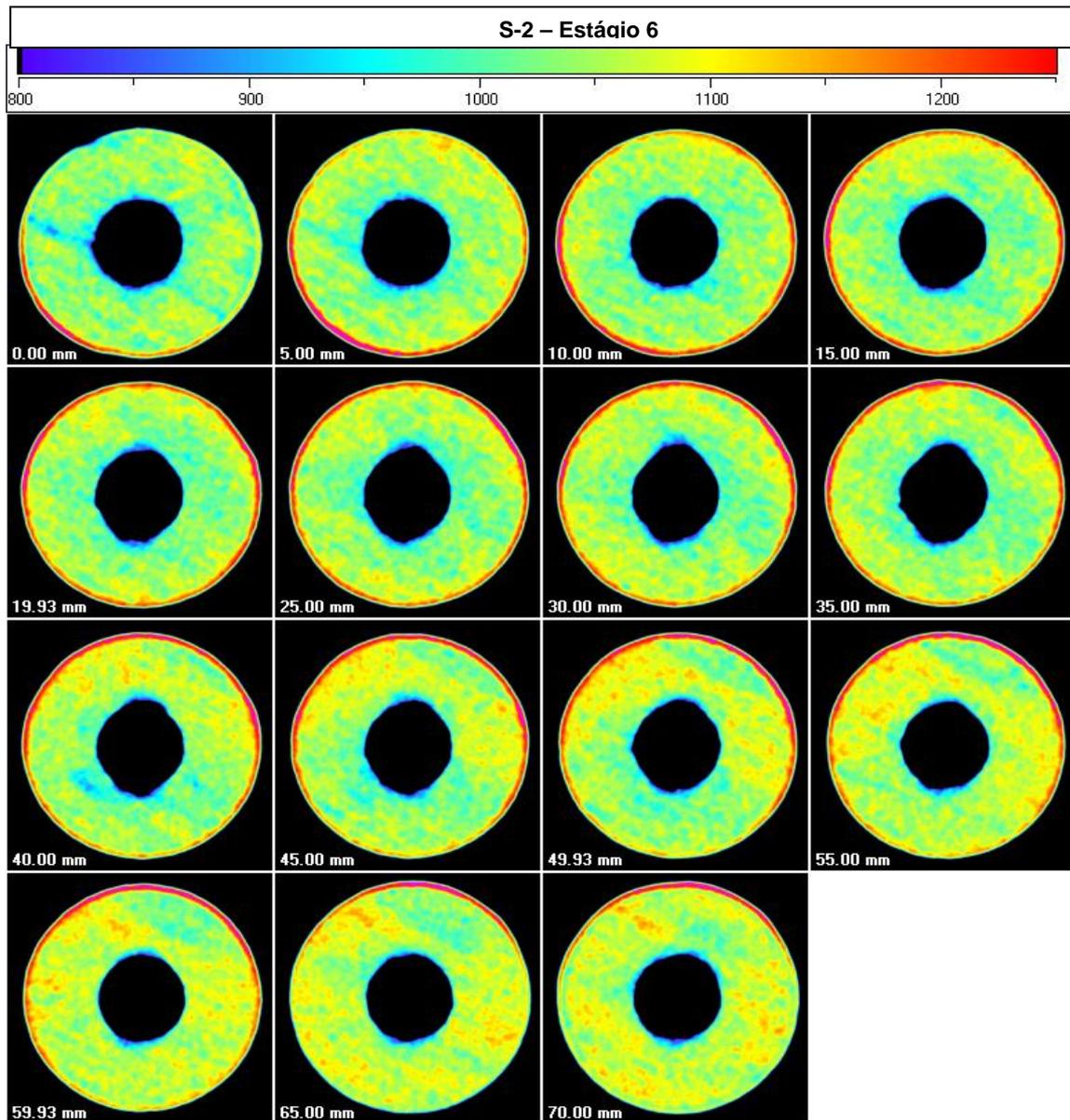
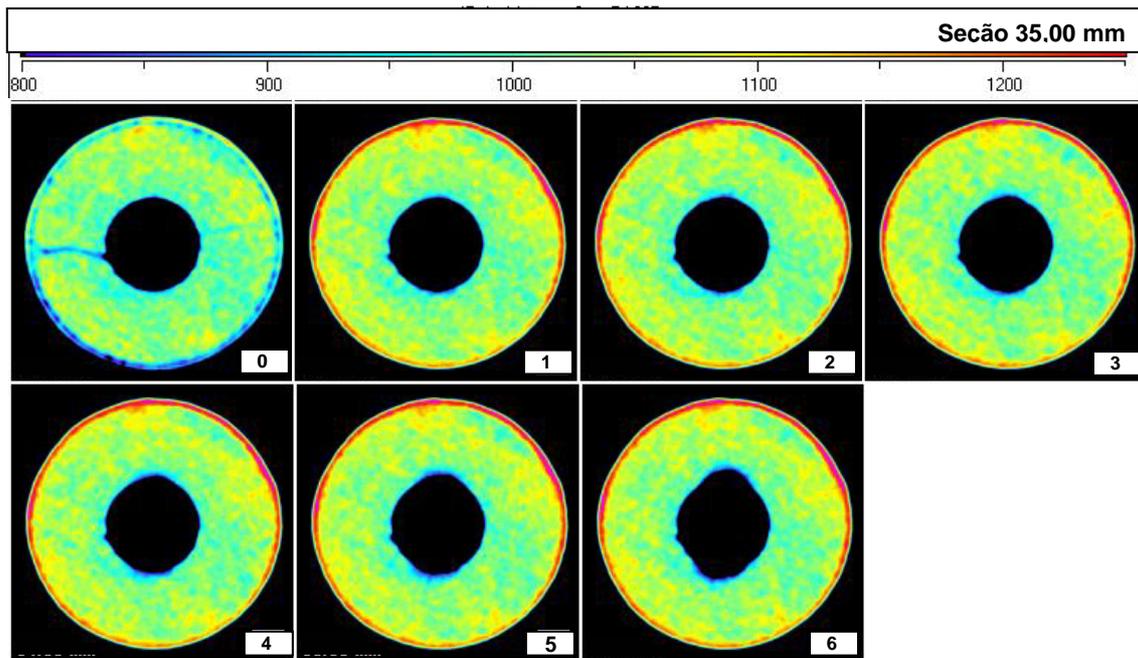


Figura 4.50 – Seções transversais do corpo de prova S-2 com pressão confinante 17Mpa. Na cavidade das seções, é observado o breakout com a forma em “V”



4.51 – Seqüência da formação de breakout na seção 35,00 mm do estágio 0 ao estágio 6.

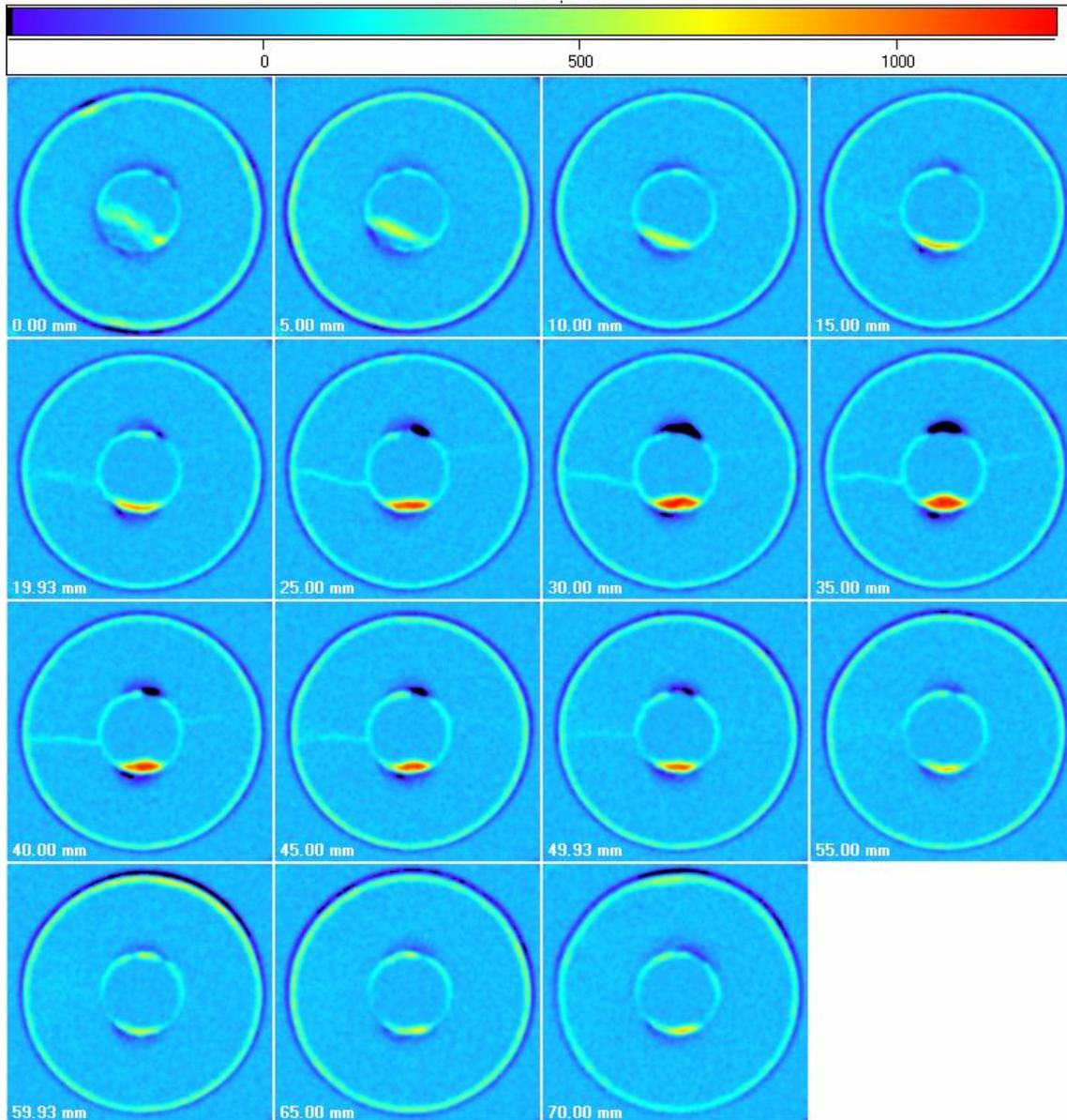


Figura 4.52 – Subtração de imagens do corpo de prova S-2 no estágio 0 menos o estágio 6. Nota-se o um pequeno acúmulo de areia nas cavidade internas por material granular.

Tabela 4.10 – Estimativa da área de breakout e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova S-2

Seção	Posição absoluta [mm]	Área Invasada (%)	Área Invasada [Pixel ²]	Área Invasada [mm ²]	Massa de areia (g)
1	1696,5	0,0260251	205	102,5	1,4
2	1701,5	0,0217088	171	85,5	1,1
3	1706,5	0,0173924	137	68,5	0,9
4	1711,5	0,0203123	160	80	1,1
5	1716,43	0,0206932	163	81,5	1,1
6	1721,5	0,0205662	162	81	1,1
7	1726,5	0,0228513	180	90	1,2
8	1731,5	0,0172655	136	68	0,9
9	1736,5	0,0200584	158	79	1,0
10	1741,5	0,0181541	143	71,5	0,9
11	1746,43	0,0161229	127	63,5	0,8
12	1751,5	0,0147264	116	58	0,8
13	1756,43	0,0142186	112	56	0,7
14	1761,5	0,0154881	122	61	0,8
15	1766,5	0,0179002	141	70,5	0,9
				Total de areia (g)	14,8

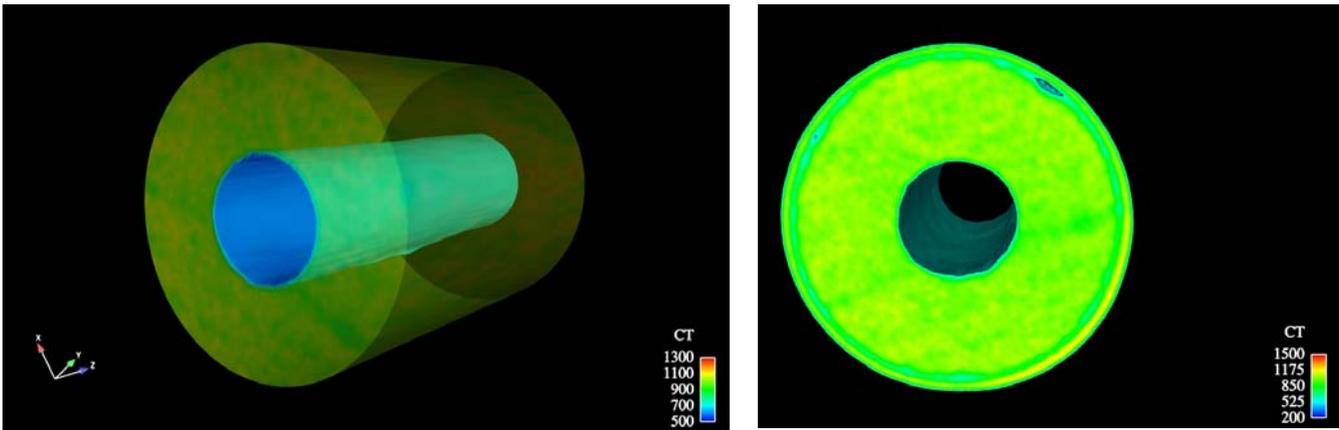


Figura 4.53 – Instantâneo da reconstrução 3D no início do ensaio.

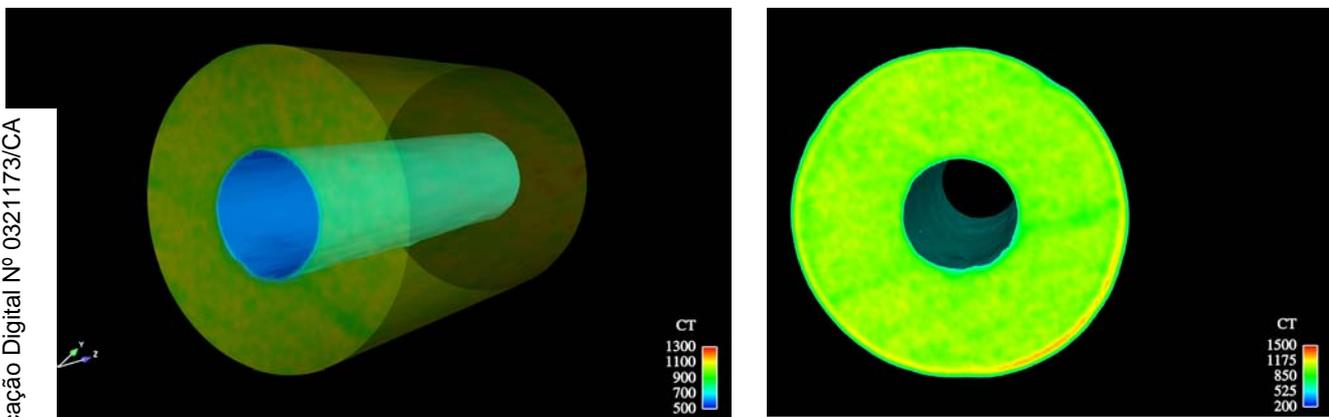


Figura 4.54 – Instantâneo da reconstrução 3D no estágio 1.

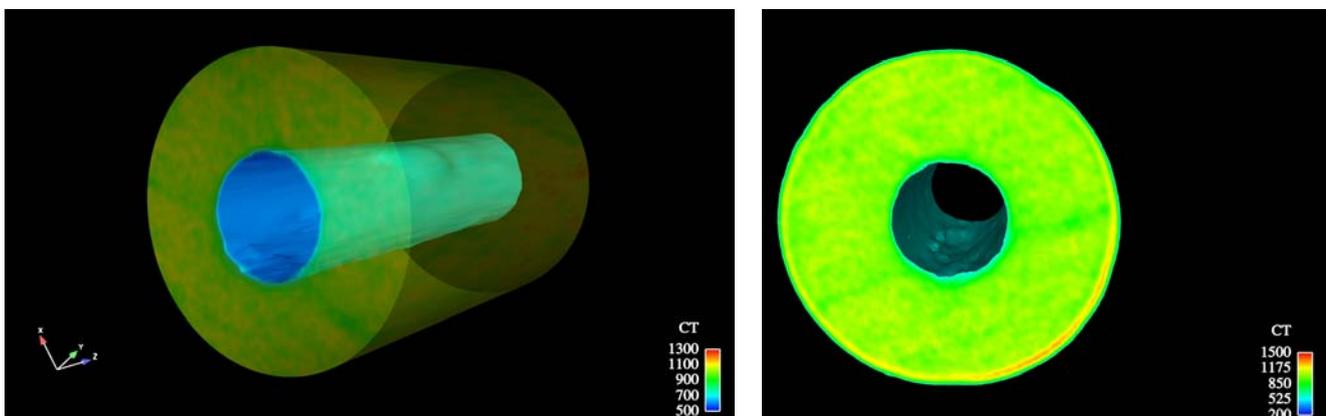


Figura 4.55 – Instantâneo da reconstrução 3D no estágio 6.